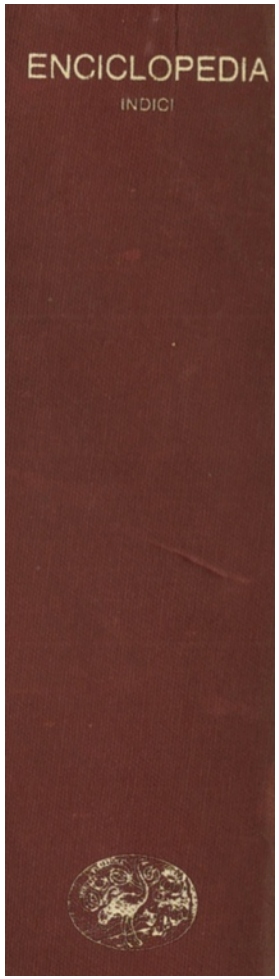


ENCICLOPEDIA EINAUDI [1982]

MATERIA

Aldo Treves - **MATERIA** pag.4

Giacomo Cavallo e Antonio Messina - **ASTRONOMIA** pag.8
COSMOLOGIE pag.22
Livio Gatton - **GRAVITAZIONE** pag.51
Renzo Alzetta e Enrico Santamato - **LUCE** pag.70
Livio Gatton - **MATERIA** pag.81
Angelo Marcello Anile - **SPAZIO/TEMPO** pag.107

ambiguità
competenza/esecuzione
fonetica
grammatica
lessico
lingua
lingua/parola
linguaggio
metrica
semantica
senso/significato
traduzione
universali/particolari

concetto
esistenza
essere
fenomeno
forma
idea
proposizione e giudizio

analogia e metafora
argomentazione
interpretazione

astratto/concreto
dialettica
identità/differenza
mediazione
opposizione/contraddizione
qualità/quantità
totalità
uno/molti

atti linguistici
dicibile/indicibile
enunciazione
presupposizione e allusione
referente

comunicazione
errore
informazione

decisione
distribuzione statistica
giochi
induzione statistica
probabilità
rappresentazione statistica
teoria/pratica

dato
etica
filosofia/filosofie
ragione
razionale/irrazionale
soggetto/oggetto
uguaglianza
valori
vero/falso
volontà

catastrofi
ciclo
evento
periodizzazione
tempo/temporalità

antico/moderno
calendario
decadenza
escatologia
età mitiche
genesi
passato/presente
progresso/reazione
storia

curve e superfici
geometria e topologia
invariante

caos/cosmo
infinito
macrocosmo/microcosmo
mondo
natura
osservazione
reale
unità

alchimia
astrologia
cabala
elementi
esoterico/essoterico

atlante
collezione
documento/monumento
fossile
memoria
rovina/restauro

armi
frontiera
guerra
imperi
nazione
tattica/strategia

deduzione/prova
equivalenza
formalizzazione
logica
possibilità/necessità
referenza/verità
ricorsività

analisi/sintesi
anticipazione
ipotesi
matematiche
metodo

differenziale
funzioni
infinitesimale
locale/globale
sistemi di riferimento
stabilità/instabilità
variazione

funzione
misura
modello
struttura
teoria/modello

alienazione
coscienza/autocoscienza
immaginazione sociale
pace
servo/signore
uomo
utopia

demagogia
discriminazione
repressione
terrore
tolleranza/intolleranza
tortura
violenza

centrato/acentrato
combinatoria
grafo
labirinto
rete

abaco
algoritmo
approssimazione
calcolo
numero
zero

applicazioni
assioma/postulato
continuo/discreto
dipendenza/indipendenza
divisibilità
dualità
insieme
razionale/algebrico/trascendente
simmetria
strutture matematiche
trasformazioni naturali / categorie

caso/probabilità
causa/effetto
certezza/dubbio
coerenza
convenzione
determinato/indeterminato
empiria/esperienza
esperimento
legge
libertà/necessità
metafisica
naturale/artificiale
operatività
paradigma
previsione e possibilità
riduzione
ripetizione
scienza
spiegazione
verificabilità/falsificabilità

categorie/categorizzazione
conoscenza
coppie filosofiche
disciplina/discipline
enciclopedia
innovazione/scoperta
insegnamento
invenzione
rappresentazione
ricerca
sistematica e classificazione

controllo/retroazione
energia
equilibrio/squilibrio
interazione
ordine/disordine
organizzazione
semplice/complesso
sistema
soglia
vincolo

analogico/digitale
automa
intelligenza artificiale
macchina
programma
simulazione
strumento

cervello
comportamento
e condizionamento
controllo sociale
emozione/motivazione
mente

apprendimento
autoregolazione/equilibrazione
cognizione
induzione/deduzione
innato/acquisito
istinto
operazioni
percezione
quoziente intellettuale

astronomia
cosmologie
gravitazione
luce
materia
spazio-tempo

atomo e molecola
conservazione/invarianza
entropia
fisica
forza/campo
moto
particella
plasma
propagazione
quanti
relatività
reversibilità/irreversibilità
stato fisico

atmosfera
litosfera
oceani
pianeti
sole
universo

adattamento
evoluzione
mutazione/selezione
polimorfismo
specie

cellula
differenziamento
immunità
individualità biologica
integrazione
invecchiamento
organismo
regolazione
sviluppo e morfogenesi

catalisi
macromolecole
metabolismo
omeostasi
organico/inorganico
osmosi
vita

eredità
gene
genotipo/fenotipo
razza
sangue

Materia

allegoria
codice
immagine
metafora
segno
significato
simbolo

avanguardia
classico
critica
filologia
letteratura
maniera
poetica
retorica

bello/brutto
creatività
espressione
fantastico
gusto
imitazione
immaginazione
progetto
riproduzione/riproducibilità
sensibilità
spazialità

alfabeto
ascolto
gesto
lettura
luogo comune
orale/scritto
parola
ritmo
scrittura
voce

discorso
finzione
generi
narrazione/narratività
stile
tema/motivo
testo

arti
artigianato
artista
attribuzione
oggetto
produzione artistica

anthropos
cultura/culture
etnocentrismi
natura/cultura

acculturazione
civiltà
futuro
selvaggio/barbaro/civilizzato

armonia
melodia
ritmica/metrica
scala
suono/rumore
tonale/atonale

colore
disegno/progetto
visione

abbigliamento
canto
corpo
danza
maschera
moda
ornamento
scena

escrementi
fertilità
nascita
sensi
sessualità
vecchiaia
vita/morte

educazione
generazioni
infanzia
morte

coltivazione
cultura materiale
industria rurale
materiali
prodotti

amore
desiderio
eros
isteria
pulsione
soma/psiche
sonno/sogno

credenze
dialetto
enigma
fiaba
mostro
popolare
proverbi
tradizioni

cannibalismo
dèi
divino
eroi
iniziazione
magia
messia
millennio
persona
puro/impuro
religione
sogno/visione
stregoneria

angoscia/colpa
castrazione e complesso
censura
identificazione e transfert
inconscio
nevrosi/psicosi
piacere

clinica
cura/normalizzazione
esclusione/integrazione
farmaco/droga
follia/delirio
medicina/medicalizzazione
normale/anormale
salute/malattia
sintomo/diagnosi

fuoco
homo
mano/manufatto
tecnica
utensile

ateo
chierico/laico
chiesa
diavolo
eresia
libertino
libro
peccato
sacro/profano
santità

demoni
divinazione
mito/rito
mythos/logos
origini

agonismo
cerimoniale
festa
feticcio
gioco
lutto
regalità
rito

casta
donna
endogamia/esogamia
famiglia
incesto
maschile/femminile
matrimonio
parentela
totem
uomo/donna

alimentazione
animale
cucina
domesticamento
fame
vegetale

caccia/raccolta
dono
eccedente
pastorizia
primitivo
reciprocità/ridistribuzione

consenso/dissenso
egemonia/dittatura
intellettuali
libertà
maggioranza/minoranza
partiti
politica

borghesi/borghesia
burocrazia
classi
contadini
ideologia
masse
proletariato
rivoluzione

economia
formazione economico-sociale
lavoro
modo di produzione
proprietà
riproduzione
transizione

abbondanza/scarsità
bisogno
consumo
imposta
lusso
oro e argento
pesi e misure
produzione/distribuzione
ricchezza
scambio
spreco

amministrazione
comunità
conflitto
élite
gergo
gruppo
marginalità
opinione
povertà
propaganda
ruolo/status
socializzazione
società
spazio sociale

accumulazione
capitale
crisi
distribuzione
fabbrica
gestione
imperialismo
impresa
mercato
merce
moneta
pianificazione
profitto
rendita
salario
utilità
valore/plusvalore

consuetudine
diritto
giustizia
istituzioni
responsabilità

costituzione
democrazia/dittatura
norma
patto
potere
potere/autorità
pubblico/privato
società civile
stato

abitazione
acqua
ambiente
città
clima
ecumene
insediamento
migrazione
paesaggio
popolazione
regione
risorse
suolo
terra
territorio
villaggio

agricoltura
città/campagna
colonie
commercio
industria
spazio economico
sviluppo/sottosviluppo

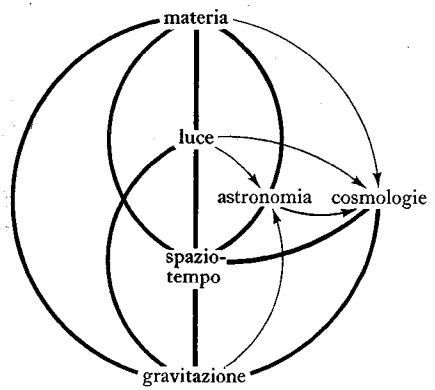
	anthropos	argomentazione	arti	calcolo	capitale	cervello	civiltà	classi	cognizione	combinatoria	comunicazione	concetto	conoscenza	corpo	creatività	cultura mat.
astronomia	4	·	·	·	·	4	·	·	·	·	·	4	6	·	4	·
cosmologie	·	·	·	4	·	·	·	·	·	·	5	4	5	·	4	·
gravitazione	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	4	3	·	3	·
luce	·	·	·	·	·	3	·	·	·	·	2	·	5	2	3	·
materia	5	·	6	·	5	3	1	2	4	1	7	6	5	·	5	5
spazio-tempo	5	·	5	·	1	4	5	5	6	6	5	7	6	6	7	4

	memoria	metodo	modo di produz.	mythos/logos	natura	normale/anormale	orale/scritto	organico/inorgan.	organismo	parentela	politica	probabilità	produzione/distrib.	regione	religione	rito
astronomia	·	5	2	4	6	3	1	·	·	·	3	4	3	3	·	·
cosmologie	4	3	·	·	5	·	2	3	4	2	·	·	·	2	3	·
gravitazione	·	5	·	·	2	·	·	·	3	·	·	3	·	2	·	·
luce	·	5	·	·	4	·	2	4	3	2	·	·	·	4	·	·
materia	1	5	4	4	7	1	4	7	5	·	·	2	4	7	4	·
spazio-tempo	5	6	3	4	6	3	6	6	6	3	3	5	5	8	5	2

	spazio-tempo	luce	materia	gravitazione	cosmologie	astronomia
spazio-tempo	·	5	5	6	7	5
luce	6	·	6	5	5	5
materia	5	5	·	4	6	3
gravitazione	5	2	5	·	5	2
cosmologie	4	·	·	3	·	·
astronomia	2	·	4	·	4	·

	dialettica	domesticam.	eccedente	enunciazione	eredità	esoterico/essoter.	evoluzione	filosofia/filosofie	fisica	generazioni	geometria e topol.	giustizia	guerra	homo	inconscio	letteratura	linguaggio	locale/globale	logica	macchina	materia
astronomia	5	·	·	2	·	4	·	4	6	·	·	3	·	·	·	2	·	5	·	3	5
cosmologie	4	4	·	·	·	2	5	5	6	·	·	·	·	3	·	·	·	2	·	·	5
gravitazione	6	·	·	·	·	·	·	·	7	·	4	·	·	·	·	·	·	5	·	2	7
luce	5	·	·	·	3	3	2	3	8	·	·	·	·	2	·	2	2	6	5	1	8
materia	6	4	2	·	2	5	5	4	9	3	·	·	1	6	·	2	2	4	2	3	8
spazio-tempo	8	4	2	3	·	·	6	6	10	3	9	4	4	3	4	4	4	9	6	6	9

	sacro/profano	segno	sistema	società	soma/psiche	spiegazione	stato	storia	strutture matem.	sviluppo/sottosvil.	tempo/temporalità	teoria/modello	testo	tolleranza/intoll.	tonale/atonale	tradizioni	universo	uomo	visione	vita/morte
astronomia	3	2	·	3	·	6	·	4	·	·	5	5	·	·	3	3	6	4	·	·
cosmologie	4	2	3	·	·	5	·	4	4	·	6	3	·	·	·	·	6	·	·	·
gravitazione	·	·	5	·	·	6	·	·	6	·	·	6	·	·	·	·	6	·	·	·
luce	2	1	5	·	·	3	·	3	6	·	5	5	·	·	·	·	7	·	6	3
materia	6	3	7	·	4	6	2	4	7	5	5	5	·	·	·	·	8	5	5	3
spazio-tempo	5	4	6	1	3	8	4	6	10	5	8	7	3	2	4	4	8	7	5	5



Materia

Astronomia, Cosmologie, Gravitazione, Luce, Materia, Spazio-tempo

Poche discipline hanno subito negli ultimi anni uno sviluppo paragonabile a quello avuto dall'✦astronomia✦, e ciò è stato causato principalmente dall'enorme espandersi della banda spettrale attraverso la quale ci giunge l'informazione astronomica.

L'osservazione di una sorgente celeste dalla banda radio a quella X sta diventando una pratica comune, che è stata resa possibile dall'evoluzione grandiosa della tecnologia e in particolare di quella spaziale. La problematica astrofisica è diventata pertanto un punto d'incontro tra vari campi di ricerca, tra i quali in precedenza l'interazione era assai scarsa. E questo è vero non solo a livello di tecniche osservative, ma altresí nel campo interpretativo.

Per illustrare questo aspetto importante della ricerca astronomica attuale si considererà il caso della Nebulosa del Granchio e della pulsar posta al suo interno.

Si tratta di un oggetto che è studiato praticamente in ogni banda dello spettro elettromagnetico. A frequenze di 10^2-10^4 MHz, la tecnica osservativa è quella radio. Nell'infrarosso i rivelatori sono essenzialmente dei bolometri realizzati con i recenti ritrovati della fisica dello stato solido. Se le osservazioni nella banda visibile sono ottenibili con la tradizionale tecnica fotografica, nell'ultravioletto, a causa dell'assorbimento atmosferico, è necessario ricorrere a rivelatori montati su un satellite. Lo spettro in questa banda deve quindi essere registrato con sensori elettronici e, una volta codificato, essere trasmesso a terra. Analoga la situazione nella banda X, dove i rivelatori possono essere contatori proporzionali o scintillatori. Nei raggi X l'immagine della sorgente può essere ricostruita facendo uso di telescopi con riflessione a piccolo angolo d'incidenza, una tecnica che ha incominciato ad essere sviluppata negli anni '60 e che ha avuto la sua massima affermazione con il telescopio montato sul satellite «Einstein» lanciato nel novembre 1978. Per i raggi γ di circa 100 MeV il metodo di rivelazione piú usato è quello a mezzo di camera a scintilla, mutuato dalla fisica delle particelle elementari. Infine a migliaia di GeV, cioè all'estremità piú energetica dello spettro, l'informazione proviene dallo studio della luce Čerenkov prodotta da sciami elettromagnetici nell'atmosfera, metodo di rivelazione sviluppato originariamente nello studio dei raggi cosmici.

Si esaminerà ora la complessità dell'aspetto interpretativo. La Nebulosa del Granchio è un resto di supernova, cioè un'enorme massa di gas in espansione che ha avuto origine da un'esplosione di supernova. Lo studio di questa espansione viene condotto usando modelli idrodinamici, o meglio magnetoidrodinamici. La determinazione di densità e temperatura viene effettuata tramite esame delle righe spettrali, cioè facendo uso della metodologia della fisica atomica. La determinazione delle proprietà della radiazione cosmica all'interno del resto

di supernova deriva, da un lato, da argomenti di fisica del plasma (per esempio la teoria dell'emissione di sincrotrone), dall'altro da argomenti di fisica nucleare (per esempio produzione di raggi γ tramite pioni). Da ultimo, lo studio della pulsar nel centro della supernova comporta sottili questioni di fisica dello stato solido quando per esempio si vogliano spiegare le variazioni brusche del periodo (*glitches*), e questioni assai complesse di fisica nucleare quando si studi la struttura globale della stella di neutroni. Se poi si affronta il problema dell'evoluzione della pulsar, cioè essenzialmente dei modi in cui essa rallenta, alla problematica dell'elettromagnetismo e della fisica del plasma vanno aggiunte considerazioni di relatività generale, poiché in questo caso le perdite energetiche per onde gravitazionali possono essere, o essere state in un passato recente, paragonabili a quelle elettromagnetiche.

Se è chiaro, dall'esempio precedente, che l'astronomia contemporanea si avvale degli sviluppi praticamente di tutti i campi della fisica, è vero anche che una delle caratteristiche salienti della ricerca attuale è di costituire essa stessa un mezzo di sviluppo di alcune teorie fisiche. Questo ha naturalmente dei precedenti di notevolissima importanza. La teoria newtoniana della ✦gravitazione✦ deriva dall'osservazione dei moti planetari. La fisica della fusione nucleare ha ricevuto la sua prima motivazione e impulso nell'esigenza di spiegare la produzione dell'energia nel Sole.

La teoria generale della relatività costituisce probabilmente il campo nel quale attualmente l'interazione con l'astronomia è piú fertile e su essa ci si concentrerà.

1. *Astrofisica relativistica.*

L'importanza degli effetti di relatività generale può essere stimata facendo il rapporto tra la dimensione scala dell'oggetto considerato e il suo raggio gravitazionale, cioè la quantità $r_G = 2GM/c^2$ dove G è la costante di gravitazione, M la massa dell'oggetto e c la velocità della ✦luce✦. In relatività generale il raggio gravitazionale ha un'importanza fondamentale. Infatti una particella che lo oltrepassi non può piú uscirne. Inoltre, quanto piú ci si avvicina ad esso, tanto piú elevato è lo spostamento verso il rosso subito dai fotoni, fino a diventare infinito, se la sorgente di fotoni si trova proprio in r_G. Nessun segnale quindi può giungere dall'interno del raggio gravitazionale, che risulta essere una regione casualmente sconnessa dell'universo che lo circonda (cfr. l'articolo ✦Spazio-tempo✦). Si ricordi infine che una particella che parte dall'infinito con energia cinetica nulla e che cade sotto l'azione del campo gravitazionale, acquista la massima energia cinetica in r_G. In fisica newtoniana tale energia è l'energia di massa della particella, cioè mc^2.

Nella tabella che segue sono riportate le masse M, i raggi gravitazionali r_G, e il rapporto ξ tra raggi gravitazionali e raggi geometrici r, per le nane bianche, per le stelle di neutroni e per i buchi neri, e infine, per confronto, per il Sole.

	M	r_G	r	ξ
Sole	2×10^{33}g $=M_\odot$	3×10^5 cm	7×10^{10} cm	4×10^{-6}
Nana bianca	1 $M_\odot$	3×10^5 cm	10^8 cm	3×10^{-3}
Stella di neutroni	1 $M_\odot$	3×10^5 cm	10^6 cm	0,3
Buco nero	—	—	—	1

Si vede che nel caso delle nane bianche, stelle che devono la loro configurazione di equilibrio alla degenerazione elettronica, il rapporto ξ è quasi mille volte piú grande che nel caso del Sole, cioè di una stella che deve il suo equilibrio alla produzione di energia tramite reazioni nucleari. Passando alle stelle di neutroni, in cui la condizione di equilibrio è dovuta alla degenerazione della componente nucleare, il rapporto cresce ancora di due ordini di grandezza. L'ultimo caso è quello dei buchi neri, di oggetti cioè che hanno subito un collasso gravitazionale completo, cosí che il raggio geometrico coincide con il raggio gravitazionale indipendentemente dalla massa. È chiaro che per questi oggetti gli effetti di relatività generale sono dominanti, e non piú piccole correzioni rispetto alla teoria newtoniana.

Le stelle di neutroni sono state osservate sotto forma di pulsar (1968) e in alcune sorgenti X binarie (1972). L'evidenza osservativa per i buchi neri non è ancora definitiva. La proposta (1971) che la sorgente X galattica Cyg X 1 contenga un buco nero di circa dieci masse solari sembra però ora assai convincente. Inoltre la maggior parte degli astronomi concorda che nel centro dei nuclei galattici attivi (vedi oltre) si trovino dei buchi neri di enorme massa, come suggerito originariamente dopo la scoperta dei primi quasar (1963). Appare quindi che dal punto di vista osservazionale l'astrofisica relativistica nasce e si sviluppa nell'ultimo ventennio.

Si esamineranno ora in qualche dettaglio tre argomenti che sembrano particolarmente significativi per illustrare la correlazione tra la problematica astronomica attuale e la teoria della relatività.

2. *Nuclei Galattici Attivi (NGA).*

Alcune galassie (di Seyfert) presentano un'eccezionale luminosità nella zona centrale. Tale luminosità appare come puntiforme, la sua estensione cioè è inferiore alla massima grandezza angolare che può essere risolta con i piú grandi telescopi.

L'attività nucleare è ben evidente non solo nella banda visibile, ma in tutte le bande spettrali, dal radio ai raggi X. Lo spettro non è di tipo termico, come quello delle stelle (spettro di corpo nero), bensí di potenza, cioè del tipo $F_\nu \div \nu^{-\alpha}$.

Un'attività nucleare talmente intensa da mascherare l'immagine stessa della galassia è con ogni probabilità l'essenza dei quasar (cfr. l'articolo ♦Cosmologie♦). Queste sorgenti presentano spostamenti verso il rosso delle righe spettrali assai

elevati ($z \equiv \Delta\lambda/\lambda \leq 3$). Se, come è ormai generalmente accettato, lo spostamento ha origine cosmologica, i quasar costituiscono una popolazione all'estremità dell'universo e le loro luminosità intrinseche sono enormi, dell'ordine di 10^{46}-10^{48} erg/sec, vale a dire alcuni ordini di grandezza maggiori di quella della nostra Galassia.

Appartengono alla classe dei NGA gli oggetti di tipo BL Lac che sono stati attentamente studiati solo negli ultimi anni. Essi si differenziano dai quasar principalmente perché non presentano righe spettrali, cosí che la determinazione della loro distanza è generalmente assai complessa.

Vanno infine menzionati come membri alla classe dei NGA, le radiogalassie. Esse appaiono come enormi regioni radioemittenti, generalmente in coppia. In alcuni casi fra i due lobi radio appare una galassia «normale». L'attività radio è correlata all'attività nucleare di quest'ultima, come dimostrato dall'osservazione di «getti» che dipartono dal nucleo e possono giungere fino ai lobi radio. Tali getti sono ben chiari nella banda radio, in alcuni casi sono osservabili nel visibile e recentemente con il satellite «Einstein» alcuni esempi sono stati evidenziati nei raggi X. I getti sono costituiti di particelle relativistiche (raggi cosmici) che, mediante un meccanismo attualmente poco compreso, vengono fortemente collimate. L'interazione con i campi magnetici fa sí che gli elettroni emettano radiazione (di sincrotrone) che rende i getti stessi visibili.

Da questi pochi cenni appare come la fenomenologia dei NGA sia assai varia e complessa. Ciò non di meno l'assenza di soluzione di continuità tra le varie classi, cosí che per esempio vi sono oggetti per i quali è arduo decidere se siano galassie di Seyfert o quasar, o se siano quasar oppure oggetti di tipo BL Lac, sta ad indicare un comune meccanismo di emissione nei vari tipi di oggetti.

Punto di partenza per l'interpretazione dei NGA è la valutazione dell'energetica totale ad essi connessa. Nel caso delle radiosorgenti essa è ricostruibile abbastanza direttamente. Infatti dall'osservazione dell'emissione radio si può risalire allo spettro degli elettroni che la producono, e questo spettro permette di ricavare l'energia totale E_{tot} che deve essere stata fornita dal nucleo galattico. Un valore tipico è $E_{tot} = 10^{62}$ erg. A stime analoghe si giunge partendo dalla luminosità dei quasar e supponendo che la loro vita media sia di alcuni milioni di anni. La massa-energia corrispondente a E_{tot} è $M = E_{tot}/c^2 \simeq 10^8\ M_\odot$, cioè un millesimo della massa della nostra galassia.

La dimensione dei nuclei galattici può essere dedotta indirettamente dalla variabilità dell'emissione. Dal fatto che un segnale non si può propagare con velocità maggiore di quella della luce c (è il postulato della relatività speciale), discende che se una sorgente varia su un tempo scala τ, il suo raggio deve essere inferiore a $c\tau$. In base a questa semplice considerazione e alle variabilità osservate, si ottiene che le dimensioni tipiche dei NGA sono dell'ordine di 10^{15} cm. Se ne deduce l'importante risultato *che la massa di un nucleo galattico deve essere contenuta in un raggio dell'ordine di quello gravitazionale.* Appare chiaro quindi che la fisica dei NGA, che sono gli oggetti piú luminosi dell'Universo, non è trattabile in termini newtoniani, ma richiede piuttosto una teoria del tipo della relatività generale.

Si discuterà ora sommariamente quale possa essere il meccanismo responsabile della produzione di energia nei NGA.

Sono stati proposti due modelli. Il primo parte dalla considerazione, già accennata in precedenza, che se si fa cadere una particella nel campo gravitazionale di un buco nero, all'approssimarsi al raggio gravitazionale la sua energia diventa paragonabile all'energia di massa. In altre parole, se un buco nero è investito da un gas di particelle, almeno in linea di principio, esso è in grado di trasformarne la massa in energia. L'efficienza della conversione può essere assai piú elevata di quella delle reazioni nucleari responsabili della luminosità delle stelle. Il meccanismo descritto è detto di accrescimento. Se esso è attivo nei NGA, si deve postulare che il buco nero in essi contenuto inghiotta una quantità di massa pari a circa un sole all'anno, cosí da spiegare la luminosità di cui si è detto prima. Tramite processi assai complicati ha poi luogo la formazione dello spettro osservato.

Il secondo modello per spiegare l'energetica dei NGA si basa sulla supposizione che l'enorme massa in essi confinata sia in rapida rotazione, cosí che, come accade per le pulsar, sia la rotazione a costituire il serbatoio di energia. Il meccanismo può funzionare sia che si consideri un buco nero in rotazione (buco nero di Kerr), sia che la massa non abbia subito il collasso gravitazionale completo, cioè abbia un raggio che, seppur confrontabile, sia maggiore del raggio gravitazionale.

Se si dispone di modelli che permettono di dar conto in maniera soddisfacente dell'enorme produzione di energia nei NGA, la spiegazione del fenomeno di eiezione di ♦materia♦ dei nuclei stessi, cioè dei getti, è ancora in uno stato primitivo. Questo appare come il problema fondamentale della fisica dei NGA e certamente costituirà una delle principali linee di ricerca nei prossimi anni.

3. *SS 433.*

Si tratta di un oggetto di tipo stellare che si trova al centro di un resto di supernova; è anche una sorgente di raggi X. Un accurato studio spettrale (1979) ha portato alla scoperta delle proprietà che lo hanno reso famoso. Le righe di emissione presentano coppie di righe satelliti spostate verso il rosso e il blu, che si allontanano e si avvicinano alla riga principale con periodicità di 160 giorni. Il fenomeno è interpretato come dovuto ad effetto Doppler con una velocità della regione emittente assolutamente enorme, essa è di circa un terzo della velocità della ♦luce♦. È questa l'unica osservazione astronomica di spostamenti verso il blu (cioè la regione emittente si avvicina all'osservatore), in cui la velocità è paragonabile a quella della luce (cfr. l'articolo ♦Cosmologie♦).

SS 433 costituisce un autentico laboratorio per la misura di effetti di relatività speciale. Per esempio in questo caso l'effetto Doppler quadratico, la cui osservazione in laboratorio terrestre è assai delicata, appare qui in forma macroscopica. La sua presenza è una delle principali indicazioni della corretta interpretazione dello spostamento delle righe spettrali (cfr. l'articolo ♦Materia♦).

Le regioni che producono le righe spostate verso il blu e il rosso sono interpretate generalmente come costituenti dei «getti» che si espandono appunto con una velocità di 0,3 *c*. La periodicità di 160 giorni è collegata a una rotazione dei getti stessi. L'oggetto è certamente galattico (la distanza è di qualche Kpc), ma la fenomenologia dei «getti» lo accomuna ai NGA. Anche in questo caso il modello prevalente è quello dell'accrescimento di un corpo collassato (stella di neutroni o buco nero), che in questo caso però deve avere una massa dell'ordine di quella solare. La produzione di energia avviene probabilmente a spese dell'energia di caduta della ♦materia♦ proveniente da una stella compagna, cioè anche qui tramite il processo di accrescimento.

SS 433 fornisce dunque l'informazione precisa che il processo di accrescimento può essere connesso all'espulsione di materia (cioè ai getti), che, come si è visto, costituisce l'aspetto piú enigmatico dei NGA.

4. *Pulsar binaria.*

Se SS 433 può essere considerato un laboratorio per studiare effetti di relatività ristretta, la pulsar PSR 1913-16 appare come un sistema praticamente ideale per costruire test osservativi alle teorie relativistiche della ♦gravitazione♦ e in particolare della relatività generale.

La proprietà che distingue questa dalle altre pulsar è l'appartenenza a un sistema binario stretto. Ciò viene dedotto dall'osservazione di una modulazione periodica della pulsazione. Lo studio di tale variazione, che è interpretato come effetto Doppler dovuto al moto orbitale della pulsar, permette di determinare il periodo orbitale, che è di circa otto ore, e l'eccentricità del sistema, che è elevatissima ($e \simeq 0{,}7$).

Tra gli effetti di relatività generale, certamente quello piú studiato è l'avanzamento del periastro, che è centomila volte maggiore di quello osservato per il perielio di Mercurio. Qui ci si concentrerà sull'evidenza, che questo sistema fornisce, dell'esistenza di onde gravitazionali.

Secondo la teoria einsteiniana, le onde gravitazionali sono associate ad una variazione temporale del momento di quadrupolo di una distribuzione di massa. La perdita di energia tramite radiazione gravitazionale è tanto piú importante quanto piú la velocità delle componenti del sistema si avvicina a quella della luce e le dimensioni al raggio gravitazionale. Tra gli eventi che possono portare a un'elevata produzione di onde gravitazionali vanno menzionate le esplosioni di supernove. Su di esse è concentrato l'attuale sforzo di rivelazione di radiazione gravitazionale.

Un sistema binario stretto costituisce anch'esso una sorgente di onde gravitazionali, benché assai piú debole dell'esplosione di una supernova. La rivelazione diretta di tale radiazione appare assolutamente impraticabile. Le conseguenze di questa emissione sul sistema che la produce sono, invece, almeno in linea di principio, osservabili. Si tratta principalmente della riduzione della separazione del sistema e della conseguente diminuzione del periodo orbitale. In

altre parole, la perdita di energia sotto forma di radiazione gravitazionale comporta un avvicinamento delle componenti.

L'effetto è naturalmente assai piccolo e può essere mascherato da altri effetti, quale l'interazione mareale o lo scambio di massa. Per tali motivi non si è mai potuto affermare di avere osservato le conseguenze della radiazione di onde gravitazionali sulla dinamica di un sistema binario, anche se a volte se ne è discusso, come per esempio nell'ambito della teoria evolutiva delle variabili cataclismiche.

Questa situazione è stata rovesciata dall'osservazione della pulsar binaria PSR 1913-16. Il fatto che la stella compagna sia invisibile mostra che si tratta di un oggetto di piccolo raggio, molto probabilmente di una stella di neutroni. Pertanto gli effetti di mascheramento menzionati prima, in questo caso devono essere trascurabili. La scoperta della diminuzione del periodo binario di questa pulsar (1977) in completo accordo con la formula dedotta da Landau e Lifschitz in base alla teoria einsteiniana, viene ora considerata come una delle prove piú significative della validità della teoria stessa.

È forse questo uno degli esempi piú chiari e convincenti del ruolo che l'osservazione astronomica sta assumendo, di sostituto dell'esperienza di laboratorio, là dove tale esperienza o è di difficile realizzazione, oppure non è neanche concepibile concretamente perché richiederebbe apparati con dimensioni assai superiori a quelle della Terra, o tempi di osservazione molto piú lunghi della vita umana. [A. T.].

Beer, P., e Hack, M.
1981 (a cura di) *Vistas in Astronomy*, vol. XXV, Pergamon Press, Oxford.

Harwit, M.
1973 *Astrophysical Concepts*, Wiley, New York.

Hawking, S. W., e Ellis, G. F. R.
1973 *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, London.

Hazard, C., e Mitton, S.
[1977] (a cura di) *Active Galactic Nuclei; Proceedings Held at the Institute of Astronomy, Aug. 1977*, Cambridge University Press, Cambridge 1979.

Hoyle, F.
1975 *Astronomy and Cosmology: a Modern Course*, Freeman, San Francisco.

Manchester, R. N., e Taylor, J. H.
1977 *Pulsars*, Freeman, San Francisco.

Misner, C. W.; Thorne, K. S.; e Wheeler, J. A.
1973 *Gravitation*, Freeman, San Francisco.

Mitton, S.
1979 *The Crab Nebula*, Scribner's, New York.

Rees, M.; Ruffini, R.; e Wheeler, J. A.
1975 *Black Holes, Gravitational Waves and Cosmology: an Introduction to Current Research*, Gordon and Breach, New York.

Taylor, J. H., e Weisberg, J. M.
1982 *A new test of general relativity: gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913-16*, in «Astrophysical Journal», CCLIII, 2, pp. 908-20.

Taylor, J. H.; Fowler, L. A.; e McCulloch, P. M.
1979 *Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR 1913-16*, in «Nature», CCLXXVII, pp. 437-40.

Zel'dovič, Ja. B., e Novikov, I. D.
1967 *Reljativistskaja astrofizika*, Nauka, Moskva (trad. ingl. University of Chicago Press, Chicago 1971).

Astronomia

L'importanza dell'astronomia è unica per lo sviluppo delle nostre idee sul mondo fisico sostanzialmente per due ragioni. In primo luogo perché si può dire che l'idea del metodo scientifico si affaccia per la prima volta quando l'uomo tenta di ridurre a sistema ordinato i moti, apparentemente caotici eppur ricorrenti, delle stelle e degli altri oggetti del cielo. In secondo luogo perché molte delle idee principali e specifiche della nostra scienza, e non solo il metodo scientifico, derivano dai primi schemi astronomici; è il caso dei concetti di spazio e tempo, di forza e moto. C'è come un flusso continuo di idee dalle prime semplici speculazioni sui moti delle stelle alla scienza del nostro secolo; flusso che segue di pari passo il passaggio dall'idea di un cielo relativamente vicino, a quella di sfera celeste rotante, al riconoscimento del sistema solare come appartenente ad una vasta galassia, ed infine all'idea di un universo di innumerevoli galassie disposte in modo non uniforme nello spazio illimitato.

Cosí come ha contribuito allo sviluppo della scienza, l'astronomia ha però anche beneficiato dello sviluppo e della scienza e della tecnica; essa si è sempre avvalsa di qualsiasi mezzo l'ingegno umano abbia escogitato: è soltanto un fatto contingente che essa si sia servita per millenni di strumenti ottici in pratica e della geometria in teoria. Coll'avvento dell'analisi matematica, l'astronomia ha immediatamente costruito la meccanica celeste; coll'avvento dell'ottica fisica, l'astronomia ha sviluppato l'analisi spettrale delle stelle. Col mutare dei mezzi di indagine, vecchi soggetti di studio dell'astronomia si rivelano in una nuova luce e con nuove prospettive. Cosí lo studio dei pianeti a poco a poco si evolve grazie al progresso delle sonde spaziali e del volo umano; sarebbe difficile pensare ormai ad una esplorazione lunare con mezzi puramente astronomici, cioè, essenzialmente, da lontano. Similmente, nuovi concetti e metodi entrano a farne parte. Si creano cosí le «nuove astronomie», nuove nei metodi e negli oggetti che esaminano. Soprattutto è interessante osservare come le nuove astronomie, quali l'astronomia radio, infrarossa, ultravioletta ed X, richiedano per il loro nascere non solo un progresso nella fisica (come il rendersi conto che la luce visibile occupa solo una ristretta banda di frequenze dello spettro elettromagnetico), ma anche un reale progresso tecnologico. Ciò ha a che vedere con l'interazione di almeno quattro fatti fisici: prima di tutto, che il ricevitore piú semplice e piú efficace di una lunghezza d'onda λ deve avere almeno una dimensione lineare dell'ordine di λ. Se poi si vuole avere un alto potere risolutivo, e cioè se si vogliono distinguere due oggetti distanti anche quando sono tra loro molto vicini, occorre che il ricevitore abbia come dimensione un multiplo il piú alto possibile di λ. Ora, sappiamo che per l'occhio basterà un'iride di qualche millimetro per avere una buona risoluzione sfruttando onde di lunghezza $\lambda \simeq 5 \cdot 10^{-5}$ cm, con rapporto 10^4. Quindi per ricevere con efficienza ottimale microonde di qualche centimetro, occorrerà un «occhio» di 10^4 centimetri per ottenere la stessa risoluzione di un occhio umano. Il radiotelescopio di Effelsberg

ha appunto un diametro di circa cento metri, ed ha quindi buone prestazioni; ma il costruire un occhio di questo genere ha richiesto tecnologie raffinatissime. Si può allora pensare che spostandosi ad onde sempre piú corte si otterrebbe un ottimo rendimento con strumenti piccoli. Sfortunatamente non è cosí: entra qui in gioco un altro fenomeno che riduce l'interazione della radiazione elettromagnetica con la materia al diminuire della lunghezza d'onda, e per rivelare la radiazione bisogna in qualche modo interagire con essa. Occorreranno allora strati sempre piú spessi di materiale per rivelare fotoni di onda cortissima e quindi di altissima energia. C'è un terzo effetto che entra in gioco: anche per la natura è sempre piú difficile produrre particelle e fotoni di energia elevata. Ne segue che i fotoni di energia altissima saranno sempre piú scarsi, e quindi occorreranno rivelatori di grande area per catturarne qualcuno. Il quarto effetto, benefico per la vita terrestre, ma di ostacolo per certa astronomia, è la presenza di un'atmosfera, che, praticamente trasparente alle radiofrequenze ed all'ottico, nonché, come ci si può aspettare, ad altissime frequenze (raggi γ), diviene opaca nelle zone dell'infrarosso, dell'ultravioletto ed X. Per indagare in queste bande di frequenza occorre quindi uscire dall'atmosfera terrestre per mezzo di razzi e satelliti o almeno recarsi negli strati piú alti dell'atmosfera con palloni sonda.

È abbastanza evidente, da quanto detto prima, che, allo stato attuale delle cose, è un'impresa non immediata e, forse, neanche opportuna, il definire che cosa si intenda oggi per astronomia. Ci limiteremo pertanto a portare alcuni esempi esaurienti degli stretti rapporti fra l'astronomia, lo sviluppo scientifico, la tecnologia e a commentarli, fornendo quelle che sono le idee odierne dell'astronomia e restando nell'ambito della nostra galassia. Gli oggetti che le recenti idee sull'universo pongono al di fuori di questa verranno trattati in altra sede.

1. *I primordi: osservazioni e primi modelli.*

Esiste un insieme di osservazioni astronomiche eseguibili ad occhio nudo, senza strumenti di precisione e quindi alla portata di qualunque individuo o gruppo di individui che abbia il tempo o la voglia di farlo. Le enumereremo per poi analizzare quali popoli le hanno realmente eseguite. 1) Si nota in primo luogo che le stelle appaiono raggruppate in costellazioni riconoscibili (il modo in cui vengono raggruppate potrebbe costituire un ottimo test di Rorschach non per gli individui ma per le popolazioni primitive che lo hanno fatto, se si riuscisse a sapere l'origine dei nomi da questi attribuiti alle varie costellazioni). 2) Dall'individuazione delle costellazioni si può poi osservare che durante la notte varia la posizione assoluta delle stelle ma non quella relativa. 3) La rotazione delle stelle avviene attorno ad un punto ben preciso della volta stellata (ai nostri giorni questo punto è pressappoco rappresentato dalla stella polare); alcune stelle sorgono e tramontano; altre non sorgono e non tramontano. 4) Il Sole appare muoversi sullo sfondo delle stelle (zodiaco): per rendersene conto basterebbe osservare quali stelle si trovano ogni sera nel punto in cui il Sole tramonta. 5) Il moto del Sole è ciclico, cioè dopo un certo periodo di tempo il Sole ritorna

nella posizione iniziale rispetto alle stelle. 6) La Luna compie un ciclo con quattro fasi particolarmente distinguibili; la durata di questo ciclo è costante. 7) Esistono altri oggetti celesti che pure mutano la loro posizione sullo sfondo delle stelle. 8) Mentre alcuni di questi procedono ininterrottamente nella stessa direzione, ripercorrendo cammini uguali dopo tempi uguali, altri paiono fermarsi in certe regioni del cielo (punti di stazione) e, dopo un movimento retrogrado ed un'altra stazione, riprendono il loro moto precedente; inoltre questi oggetti appaiono diversamente luminosi in tempi diversi. 9) Si possono stabilire quattro stagioni prendendo come base quattro giorni fondamentali: il giorno piú lungo (solstizio d'estate), la notte piú lunga (solstizio d'inverno), ed i due equinozi, in cui giorno e notte hanno uguale durata. 10) Il tempo tra equinozio di primavera ed equinozio d'autunno è piú lungo (di circa sei giorni) del tempo per tornare all'equinozio di primavera. Altre osservazioni sono piú complesse e richiedono generazioni di osservatori per compierle. Non tutti i popoli hanno compiuto queste osservazioni, e, tra quelli che lo hanno fatto, non tutti hanno seguito lo stesso metodo, o le hanno finalizzate agli stessi obiettivi, o le hanno inquadrate in un ben preciso ambito filosofico o religioso.

Una forse troppo comoda equazione, dovuta allo Schiapparelli, è quella che l'astronomia moderna sorge quando si fondono diversi elementi, cioè le osservazioni accurate dei Babilonesi, l'orientamento geometrico degli Egiziani, l'orientamento numerico indiano, e la speculazione greca. Inevitabilmente il punto di incontro di questi elementi è Alessandria d'Egitto, dove nasce l'astronomia. Ciò che precede è la preistoria astronomica.

Tra le civiltà rimaste ai primordi, i Cinesi, per esempio, hanno suddiviso le stelle in circa trecento costellazioni, ma ignorano molte costellazioni australi, che pure erano alla loro portata; ignorano lo zodiaco solare. Le loro osservazioni sono tuttavia precise e durature, e a suo tempo daranno i loro risultati. Ma qualcosa succede ad un certo punto all'astronomia cinese, che si arresta nel suo sviluppo e pare corrompersi: i Gesuiti, nel Seicento, troveranno un terreno praticamente vergine.

Neanche gli Indiani dànno gran peso alle costellazioni australi; però credono nella rotazione terrestre, e posseggono uno zodiaco lunare. È curioso questo disinteresse per le costellazioni australi: esso suggerisce che i nomi delle costellazioni vengono dati in una ben determinata fase dell'evoluzione di una popolazione, di modo che, se questa emigra dopo che i nomi sono stati dati, le nuove costellazioni restano anonime.

I Babilonesi lasciano una eredità di continue e sistematiche osservazioni astronomiche: hanno effettuato tutte le osservazioni da noi enumerate, e qualcuna in piú; posseggono tavole con cui predicono la posizione dei pianeti per gli anni a venire, hanno probabilmente identificato la stella Venere nelle due forme di stella della sera e stella del mattino, hanno scoperto il ciclo di 223 lunazioni (saros) dopo cui le posizioni relative di Sole, Terra, Luna (e quindi le eclissi) si ripetono; hanno un concetto abbastanza preciso di che cosa sono le comete, da confrontarsi colle farneticazioni dell'Occidente dal medioevo fino a Hegel. Inoltre tentano di dare un ulteriore contenuto pratico a questo patrimonio di conoscenze, forse inizialmente motivate dal sorgere di una società agricola e urbana con le sue scadenze, che richiedono un calendario preciso. L'astrologia che ne deriva, però, è quasi una scienza: i Babilonesi tengono statistiche aggiornate per scoprire correlazioni tra fenomeni celesti o altri prodigi naturali e gli avvenimenti terrestri.

Agli Egiziani è attribuita la scoperta dell'anno sotiaco (1460 anni), che è, in un certo qual modo, la scoperta che l'anno non è costituito da un numero intero di giorni. A questi tempi probabilmente risalgono le osservazioni che permisero la scoperta della precessione degli equinozi (anno platonico). Per raggiungere questi risultati è necessario un concorrere di circostanze, quali l'esistenza di una società agricola abbastanza sofisticata, la presenza di segnatempo stagionali abbastanza precisi (le piene del Nilo), ed una certa stabilità dei moti celesti. Il fatto che l'anno sotiaco fosse noto agli Egiziani (ed uno di essi iniziasse intorno al 165 d. C.) fa appunto supporre che non siano intervenuti grandi cambiamenti astronomici, almeno tra questa data ed il 1300 a. C., il che forse basta per porre in dubbio recenti sensazionali teorie che una collisione fra pianeti abbia grandemente modificato i moti celesti.

È da sottolineare che in questo periodo si cristallizza la convenzione delle grandezze, che tanto contribuisce a rendere ostici i primi passi dell'astronomo dilettante. Gli antichi, che non possedevano strumenti di misura oggettivi, suddivisero le stelle in sei classi. Le stelle della prima classe *appaiono* cinque volte piú luminose di quelle della sesta. L'introduzione di strumenti di misura oggettivi permise di osservare che, cosí facendo, gli antichi non si discostavano dalla legge, ben nota ai fisiologi, di Weber-Fechner, secondo cui uguali rapporti degli stimoli (luminosi, acustici) corrispondono ad uguali incrementi delle sensazioni (luminose, acustiche), o, meglio, che la differenza di sensazione è proporzionale al logaritmo del rapporto delle intensità.

In altre parole, se l'occhio dell'astronomo rivela che una stella di prima grandezza è una volta piú luminosa di una stella di seconda grandezza e due volte piú di una di terza grandezza, ecc., vuol dire che il flusso di energia luminosa ricevuto da una stella di prima grandezza è k volte ($k = 2{,}5$) maggiore del flusso ricevuto da una stella di seconda grandezza, k^2 volte il flusso ricevuto da una di terza e cosí via. Il tentativo di salvare le tradizioni introducendo quantità oggettive ha fatto utilizzare la formula

$$\text{grandezza relativa} = -2{,}5 \log (\text{flusso ricevuto}) + \text{costante}.$$

Per cui, fissata una stella qualsiasi come quella di grandezza 0, definiremo stelle di grandezza -1 quelle k volte piú luminose delle stelle di grandezza 0, e k^2 volte piú luminose delle stelle di grandezza 1. Il problema viene complicato dal fatto che, come si è già visto, l'occhio è sensibile unicamente ad una ristretta banda di frequenze. Può cosí accadere che una data sorgente celeste sia inesistente per l'occhio umano, mentre in realtà l'energia emessa su frequenze a cui l'occhio umano non è sensibile (radio o X) può essere enorme. In piccola misura, cioè per sorgenti che emettono su lunghezze d'onda confrontabili con quelle ottiche, questo errore è corretto per mezzo della cosiddetta correzione

bolometrica, che, supponendo che la sorgente abbia uno spettro di corpo nero, noto in funzione della temperatura e della frequenza, calcola quale frazione dell'energia va a cadere nella banda ottica. Naturalmente non è affatto detto che le sorgenti celesti abbiano uno spettro di corpo nero, sia pure a differenti temperature, ma questa ipotesi risulta abbastanza ben realizzata nel caso delle stelle.

Delle numerose ed eterogenee scuole di pensiero greche, a parte una eredità di intuizioni e di successi stupefacenti che doveva poi essere utilizzata dopo parecchi secoli, resta la sintesi operata da Claudio Tolomeo, in cui, come abbiamo già accennato, confluiscono anche ricchi contributi indiani, babilonesi ed egiziani. Per quanto fatta segno di condanne altrettanto esagerate quanto le lodi precedenti, essa sopravvive con una certa vitalità nelle rubriche astrologiche i cui lettori si trovano, forse senza saperlo, in epoca tolemaica o addirittura in epoca pretolemaica; non solo concettualmente per l'uso che si fa di case del cielo, congiunzioni ed opposizioni, che, benevolmente, possono essere giustificate come un effetto di una scelta non ottimale del sistema di riferimento, ma anche cronologicamente, poiché la precessione degli equinozi (e cioè il fatto che il Sole non si trovi, negli equinozi, sempre fra le stelle della stessa costellazione) ha irrimediabilmente spostato le date: il Sole è in Ariete in maggio e non in marzo.

Il nucleo della sintesi tolemaica è l'eterno contrasto tra teoria e pratica: Platone, basandosi forse su di una imperfetta conoscenza del moto dei corpi celesti e ritenendo le teorie fisiche comprensibili solo nel contesto di ben definite ipotesi metafisiche, aveva infine stabilito che il moto perfetto, cioè il moto a velocità uniforme su orbite circolari, di cui la Terra occupa il centro, è quello che compete ai corpi celesti stessi. Affiora qui uno dei grandi filoni della ricerca teorica: è chiaro che per Platone moto perfetto significa moto che gode della massima simmetria. Non è questo il luogo per trattare le molte facce di questa che potremmo chiamare l'ossessione della simmetria: in fisica particellare moderna si parla sovente di simmetrie spezzate, e della speranza che subito nasce di ricomporle in una simmetria superiore. Ci sono altri filoni di pari passo con questo: ne vogliamo menzionare ora due, cioè il dogma della massima semplicità delle dottrine fisiche, e l'ipotesi evolutiva che ne deriva. Questa ipotesi è soprattutto frequente nelle scienze osservative come l'astronomia: esaminando cioè una collezione di oggetti diversi, la piú semplice sistemazione teorica che si intende darne è che essi rappresentano fasi diverse di un'unica specie.

Dunque, Platone richiedeva moti circolari a velocità costante, mentre le osservazioni già da tempo contraddicevano tanta semplicità. Probabilmente però questo non preoccupava Platone, che non si aspettava comunque una perfetta aderenza al modello iperuranico da parte di corpi naturali. Ma altri astronomi ed Aristotele stesso, interessato anche alla spiegazione del mondo fisico e non solo alla costruzione di modelli matematici che descrivessero il moto degli oggetti celesti, incominciarono con lo scendere ad un primo compromesso affermando che, anche se il moto dei corpi celesti non è circolare uniforme, può tuttavia almeno essere scomposto in un numero finito di moti circolari uniformi. Il primo modello, dovuto ad Eudosso, è il modello delle sfere omocentriche.

E il moto geometrico dei corpi celesti viene spiegato in questo sistema particolarmente ingegnoso, in cui varie sfere con lo stesso centro, ma assi diversi, vengono trascinate nella rotazione le une dalle altre, componendo cosí tutti i moti voluti. Risulta abbastanza chiaro, dai documenti che restano, che il modello di Eudosso, che richiede ventisei sfere, è matematico e quindi legittimo, perché è inteso solo alla descrizione del moto e non alla spiegazione della sua natura. Invece Aristotele costruisce un modello meccanico, poiché si preoccupa del modo in cui il moto è trasmesso da una sfera all'altra: gli occorrono quindi cinquantacinque sfere, ed il suo modello è, secondo il nostro modo di vedere, sbagliato. In ogni caso le sfere omocentriche non vivono a lungo, in quanto in questo modello non tutte le osservazioni sono spiegate: un pianeta è sempre alla stessa distanza dalla Terra, e restano quindi inspiegate le sue talvolta notevolissime variazioni di luminosità, ben note agli astronomi antichi.

Il modello portato a compimento da Tolomeo è piú semplice ed efficace: fa uso dei due concetti fondamentali ormai arcinoti di deferente ed epiciclo (cfr. fig. 1). Moti anche assai complicati possono essere cosí scomposti usando un numero opportuno di deferenti ed epicicli (cfr. fig. 2): la versione tolemaica prevede, nella sua fase finale, piú di cinquanta cerchi. Ci si può chiedere come questo modello possa accordarsi con la visione aristotelica delle sfere omocentriche: infatti c'era un certo disaccordo con cui si dovette venire a compromesso nella costruzione dei modelli medievali. Tuttavia Tolomeo introduce un concetto ben piú rivoluzionario, quello di equante (cfr. fig. 3), che, in sostanza, permette ad un corpo celeste (per esempio il Sole) di muoversi a velocità non uniforme su un'orbita circolare. Qui il quadro perfetto di Platone è ormai perduto: Copernico vuole tornare alle origini e, declassando la Terra a pianeta, vorrà ritornare ai moti circolari uniformi; l'abolizione dell'equante sarà il suo massimo sogno, e non per niente gli occorsero quasi altrettanti cerchi per riuscirci. Ci vorrà Keplero, per rinunciare definitivamente all'illusione platonica.

È forse giusto chiedersi ora perché gli astronomi non fossero soddisfatti di una dottrina come quella tolemaica che, grazie ad un opportuno armamentario di deferenti, epicicli ed equanti, poteva render conto di qualsiasi movimento celeste.

La discussione su questo punto è ancora vaga, per quanto non manchino ipotesi. Certo, Copernico era motivato da ragioni estetico-filosofiche quali il desiderio di conservare i moti perfetti; tuttavia la critica a Tolomeo poteva porsi anche su di un piano diverso. La dottrina tolemaica non era in grado di predire il moto di un pianeta se non come ripetizione di un moto già esaminato, essendo essenzialmente descrittiva: dato il moto di un pianeta (e per conoscerlo occorreva osservarne un ciclo completo) poteva costruirne tavole perpetue. La capricciosità del numero e delle dimensioni di deferenti ed epicicli, e della posizione dell'equante, lasciava insoluta la domanda: perché i pianeti debbono comportarsi cosí diversamente? Ciascuno dovrebbe portare in sé i suoi parametri *ab initio*. A queste domande non c'era risposta. Queste considerazioni sono state condensate nella sentenza che «il sistema tolemaico era tale che non si poteva mai coglierlo in errore», e si sono costruite dottrine epistemologiche basate

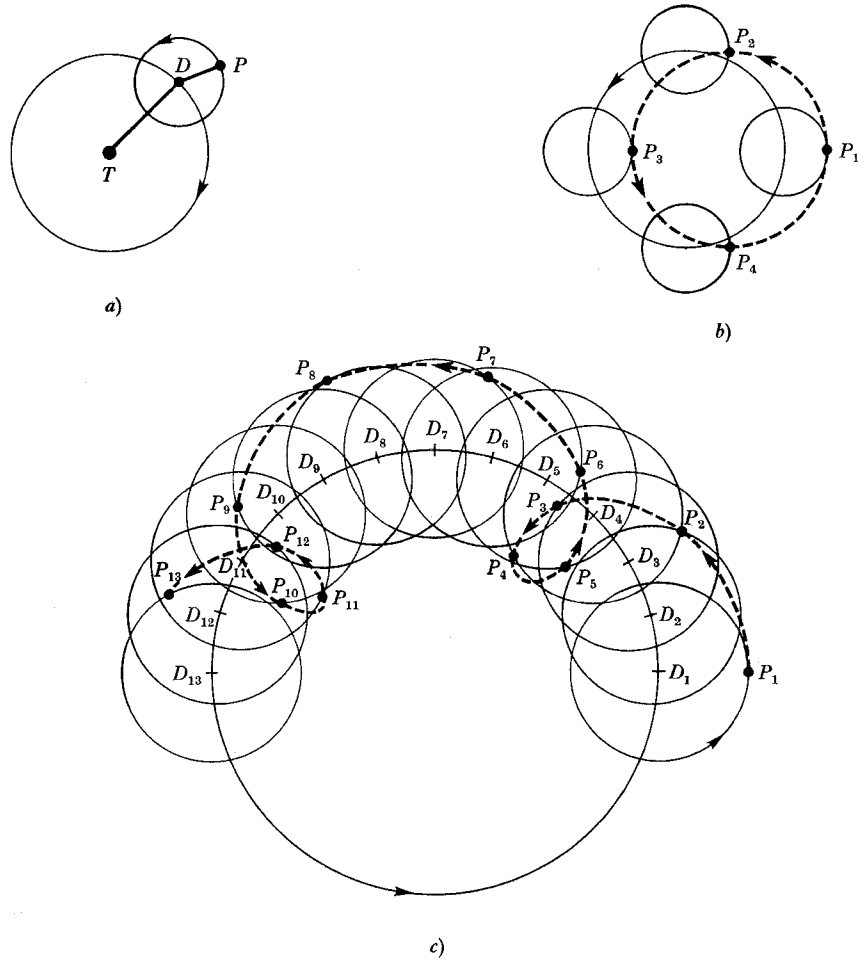


Figura 1.

Nella figura *a*) è rappresentato il moto epiciclico di un oggetto *P*. Sono possibili due tipi di movimento: uno uniforme di *P* sulla circonferenza di centro *D* (chiamata epiciclo), in cui il raggio *DP* descrive angoli uguali in intervalli di tempo uguali; l'altro, pure uniforme, di *D* sulla circonferenza di centro *T* (chiamata deferente), in cui il raggio *TD* descrive angoli uguali in intervalli di tempo uguali. Le velocità, i raggi ed il verso della rotazione non sono necessariamente collegati. Due possibili traiettorie, ottenibili dalla composizione di questi due movimenti, sono mostrate in *b*) e *c*). In *b*) si suppone che il moto lungo l'epiciclo sia molto piú lento di quello lungo il deferente, in *c*) si fa l'ipotesi inversa. Da notare che con un tipo di moto come quello descritto in *c*), un osservatore posto al centro del deferente vedrebbe, nelle posizioni P_3, P_4, P_5 e P_{10}, P_{11}, P_{12}, l'oggetto *P* andare avanti e indietro sullo sfondo delle stelle.

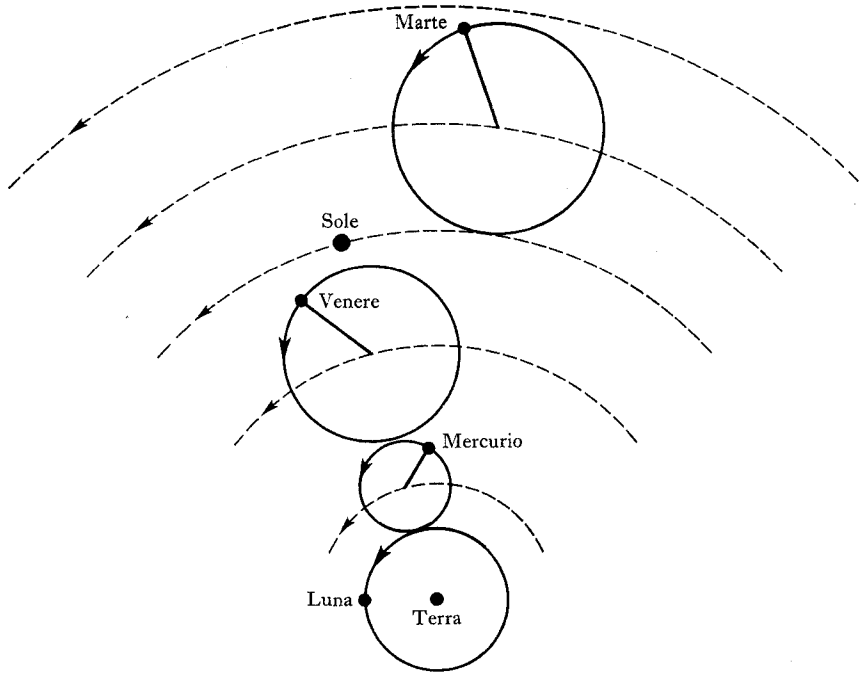


Figura 2.

Il diagramma descrive in modo schematico l'ordine dei pianeti e mostra alcuni epicicli nel sistema tolemaico. Dopo Marte ci sono Giove, Saturno e le stelle fisse.

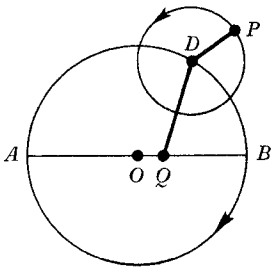


Figura 3.

La figura descrive l'equante di Tolomeo. In questo caso si hanno ancora due possibili moti: uno uniforme di *P* sulla circonferenza di centro *D*, in cui il raggio *DP* descrive angoli uguali in intervalli di tempo uguali; l'altro di *D* sulla circonferenza di centro *O*, in cui però non è il raggio *OD* che si muove uniformemente intorno ad *O* bensí il segmento *QD* che si muove uniformemente intorno a *Q*. È il punto *Q* che viene chiamato equante.

sul fatto che teorie scientifiche di questo genere sono inaccettabili. Senza discutere l'universalità di questa affermazione bisogna ammettere che la falsificabilità di una dottrina è probabilmente una condizione voluta per lo meno soggettivamente: dottrine scientifiche che tengano in riserva un certo numero di parametri liberi (e non ne mancano) lasciano perplesso lo studioso, e certo nessuno oserebbe piú proporre una teoria fisica potenzialmente dotata di infiniti parametri liberi, come quella di Tolomeo. Allo stesso modo nuove scienze o pseudoscienze lasciano perplesso lo studioso delle scienze convenzionali, il cui fondamento è il metodo sperimentale, e il cui strumento logico è la matematica, non tanto perché quelle non si servono né dell'uno né dell'altra, quanto perché ci si rende conto che è impossibile coglierle in errore.

Tornando però al caso in esame, ci si deve render conto che si ragiona in base ad esigenze moderne. Sarebbe giusto chiedersi quali fossero gli scopi dell'astronomia ellenistica: se quello di costruire teorie scientifiche in senso moderno, o non piuttosto quello di fornire una descrizione dei cieli nello schema generale di una fisica e cosmologia aristotelica.

Per quanto riguarda il sistema copernicano (cfr. fig. 4) possiamo affermare che esso introduce implicitamente un concetto che avrà delle vaste ripercussioni in futuro: quello di sistema di riferimento. I moti dei pianeti e delle stelle vengono esaminati non piú rispetto alla Terra bensí rispetto al Sole. Non si tratta di maggiore semplicità (il sistema copernicano, come si è detto, richiedeva un numero di epicicli paragonabile a quello utilizzato da Tolomeo), né della intuizione che è la Terra a ruotare intorno al Sole invece che il Sole intorno alla Terra; questa sarebbe una intuizione addirittura erronea, perché non è in realtà questo l'insegnamento della teoria della gravitazione newtoniana: Sole e Terra ruotano intorno al baricentro del sistema da essi costituito. Si tratta invece del tentativo di analizzare il moto degli oggetti nel cielo rispetto ad un nuovo sistema di riferimento, che, per quanto si poteva osservare a quei tempi, aveva meno credibilità di quello tolemaico, e che, purtuttavia, avrebbe avuto – una volta che si fosse superata l'ipotesi a priori che i moti circolari uniformi erano *ovviamente* la migliore espressione dell'armonia celeste – una serie di implicazioni esplosive, non ultima quella sulle dimensioni dell'universo: abolito il primo mobile, e quindi il moto all'unisono delle stelle, non c'è piú alcun motivo perché queste rimangano tutte alla stessa distanza dalla Terra. Il discorso del sistema di riferimento si ripresenta piú tardi nella fisica: il moto delle stelle intorno alla Terra non può corrispondere ad una situazione fisica reale, perché ciò richiederebbe per la maggior parte dei corpi celesti una velocità di percorrenza dell'orbita superiore a quella della luce, il che, come è noto, è vietato dalla teoria della relatività ristretta. Non è dunque vero che ogni sistema è legittimo per la descrizione del moto? Chi ci aiuterà a scegliere i sistemi legittimi? La risposta è che utilizzando un sistema illegittimo compaiono forze a cui non possiamo attribuire una sorgente fisica. Sono le pseudoforze che agiscono nei sistemi «non inerziali», sistemi in cui le particelle non soggette a forze non si muovono di moto rettilineo ed uniforme come nei sistemi legittimi o inerziali.

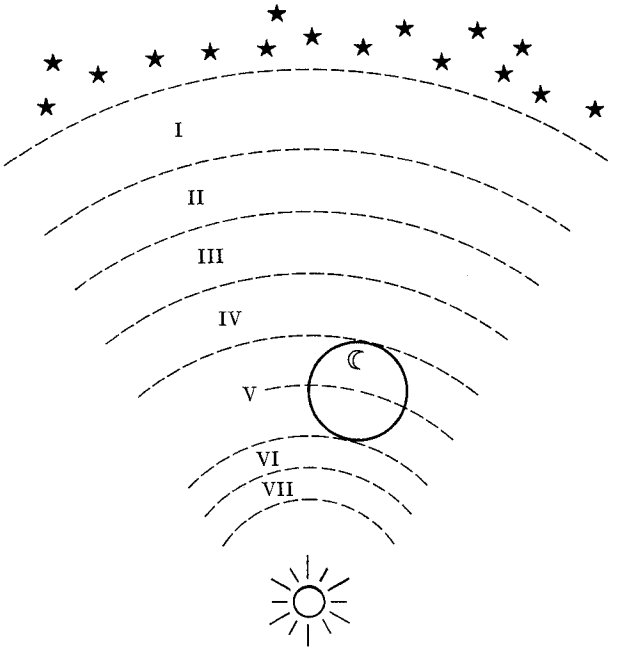


Figura 4.

Rappresentazione schematica del sistema copernicano. Le circonferenze rappresentano le sezioni delle sfere celesti. I) Sfera delle stelle fisse. II) Sfera di Saturno, che compie una rivoluzione in trent'anni. III) Sfera di Giove, che compie una rivoluzione in dodici anni. IV) Sfera di Marte, che compie una rivoluzione in due anni. V) Sfera della Terra con l'orbita della Luna, tempo di rivoluzione un anno. VI) Sfera di Venere che compie una rotazione completa in nove mesi. VII) Mercurio, periodo di rivoluzione ottanta giorni.

2. *La formalizzazione dei modelli.*

È in Keplero che si ravvisano le varie fasi dell'evoluzione scientifica del Rinascimento. La sua visione iniziale dell'universo è mistico-platonica: nel suo *Mysterium Cosmographicum* (composto quando era ventiquattrenne) viene enunciata quella che alcuni storici chiamano impietosamente la quarta legge o legge sbagliata di Keplero. Questa legge mette in relazione le distanze dei pianeti dal Sole con i raggi delle sfere inscritte e circoscritte ai cinque (e solo cinque!) poliedri regolari: tutto ciò che ne nascerà sarà un modello di una coppa complicatissima offerta in dono all'elettore del Württemberg. Tuttavia si nota lo sforzo di costruire una nuova mistica anche piú sublime di quella platonica, quasi a consolazione del perduto posto di privilegio dei terrestri. Ma questa fase del pensiero di Keplero è transitoria: i due postulati fondamentali della visione

platonica (moti circolari e uniformi), già minati ed aggirati fin dall'antichità classica, vengono definitivamente spazzati via con la scoperta che le orbite dei pianeti sono ellissi che i pianeti non percorrono a velocità uniforme. Mentre esistevano già le premesse della seconda legge almeno nel caso del moto relativo della Terra e del Sole (si ricordi l'introduzione dell'equante fatta da Tolomeo), la prima legge rappresenta un notevolissimo passo avanti, la cui importanza non può essere valutata da chi è digiuno di geometria: infatti l'ellisse è soltanto una fra una infinità di curve a cui nel linguaggio comune si dà il nome di ovale o cerchio schiacciato. Solo misure estremamente accurate, e calcoli laboriosi, oltreché una certa felicità nella scelta (dovuta probabilmente al criterio di massima semplicità), permisero l'identificazione dell'orbita dei pianeti precisamente con una delle tre sezioni coniche considerate milleottocento anni prima da Apollonio di Perga. Sono episodi come questi che fanno meditare sull'utilità della ricerca che non ha scopi pratici immediati.

Appare qui per la prima volta un nuovo atteggiamento nei confronti dei *fenomeni osservati* e il tentativo di formulare i risultati delle osservazioni in termini di relazioni algebriche e geometriche. Si fa strada l'idea che la base per la formulazione di ipotesi fisiche o per la verifica dell'attendibilità di ipotesi o modelli diversi debba essere l'osservazione dei fenomeni fisici. È sull'osservazione del moto dei pianeti che si basano le leggi di Keplero. È sull'osservazione dei satelliti di Giove, della superficie della Luna, della struttura della Via Lattea, delle stelle fisse che si basa Galileo per affermare la superiorità del sistema copernicano su quello tolemaico. È sulla base di queste idee che Galileo si scontra duramente con la Chiesa e ne esce temporaneamente sconfitto. A preparare questo scontro, tanto celebrato e discusso, contribuiscono diversi fattori, ma essenziali risultano la aristotelizzazione della filosofia naturale, e, poi, la cattolicizzazione di Aristotele. Questi non furono affatto processi momentanei né univoci, ma ebbero lunga gestazione e fasi alterne. Comunque il risultato fu che la scienza dell'epoca e la religione ufficiale si trovarono a dipendere criticamente dalla fedeltà ad Aristotele: non, si badi bene, nei dettagli, ma negli aspetti globali, che venivano minati dalla rivoluzione copernicana. Infatti, nei dettagli, Aristotele era già stato piú volte contestato dai tanto vituperati, ma certo combattivi e tutt'altro che pedestri, scolastici. Con Copernico però minacciava di crollare tutta la fisica aristotelica e con essa la sistemazione tomistica della fede cattolica. Era l'egemonia culturale della Chiesa, e il sistema di potere che su di esso poggiava, in gioco nel 1616 e poi nel 1633, e non la fede cattolica. E per non perdere questo potere la Chiesa fu obbligata a condurre la sua battaglia, a lungo termine perdente, e, forse, i giudizi sull'opportunità o meno e sui risultati di essa andrebbero rivisti in termini di necessità piú che di scelta.

Forse si spiegherebbe cosí il risultato curioso che la Chiesa avversatrice di Aristotele fino al XIII secolo, fautrice nel Rinascimento degli studi astronomici, anzi proprio dei loro aspetti pratici e sociali (non si dimentichi che aveva favorito studi per la costruzione di tavole per la navigazione alle prese con l'annoso problema della determinazione della longitudine e per la riforma del calendario), si trovò a combattere una battaglia perdente e con argomenti già sostanzialmente

controbattuti dallo stesso san Tommaso, quale l'aderenza letterale alle Scritture.

La questione, con le conoscenze del tempo, non poteva portare a risultati conclusivi, perché, come abbiamo già accennato, era unicamente una discussione sulla validità o meno di un sistema di riferimento. Mancando a quel tempo una dinamica e addirittura un chiaro concetto di inerzia, e non essendo osservata una parallasse (cfr. fig. 5), la descrizione dei moti celesti in base ad un sistema o all'altro era ugualmente legittima, e la Chiesa poteva giustamente richiedere che non si affermasse categoricamente come sbagliata la descrizione tolemaica, oltre tutto piú accessibile ai sensi. Non è chiaro quale delle due parti fu piú categorica nell'opinione errata di dichiarare in errore l'altra. Quale delle due sia stata, essa (da un punto di vista strettamente scientifico) ebbe torto.

Resta da osservare, per gli amanti del paradosso, che l'astronomia, pur essendo tra le prime a godere dello sviluppo della matematica e della fisica, non è tuttavia una scienza sperimentale in senso galileiano. Non lo era l'astronomia classica, il cui scopo era la descrizione dei corpi celesti e lo studio dei loro moti reali o apparenti, e non lo è l'astrofisica, che piú propriamente indaga sulla natura di questi corpi.

Per scienza galileiana naturalmente intendiamo una scienza in cui le condizioni iniziali ed al contorno dell'esperimento sono (in realtà o per ipotesi) nelle mani dello sperimentatore. Ora, alcuni degli esperimenti che si svolgono in natura sono assolutamente irrealizzabili da parte dell'uomo; altri lo saranno probabilmente per lungo tempo. Di tutti, le condizioni iniziali sono in gran parte ignote e comunque al di fuori della portata dello sperimentatore. Cosí l'indagine deve necessariamente rivolgersi non solo alla situazione presente degli esperimenti, ma anche al loro risultato ed alle condizioni iniziali. Di qui l'interesse necessario non solo nella descrizione dei corpi celesti quali ci appaiono in una specie di istantanea (e diciamo specie, perché le informazioni sui corpi piú lontani sono partite in un tempo assai piú remoto di quelli piú vicini) ma anche alle origini ed allo stato finale dei medesimi. Il diagramma stellare di Hertzsprung-Russell è un esempio di istantanea di un gran numero di esperimenti iniziati in tempi diversi e con diverse condizioni iniziali. Lo scopo di tutti questi esperimenti sembra essere uno solo: vedere se una massa gassosa può raggiungere una condizione di equilibrio stabile. I parametri iniziali sono massa totale e composizione iniziale, i risultati dell'esperimento sono noti e sono in gran parte fallimentari: cioè la massa gassosa per lo piú non riesce ad equilibrare la forza gravitazionale e si contrae indefinitamente.

Tuttavia l'astronomia, e soprattutto l'astrofisica, può partecipare in qualche misura del carattere di scienza sperimentale. Qui ci riferiamo agli esperimenti accennati prima, assolutamente o contingentemente irrealizzabili su scala terrestre. In tal caso l'astronomo assiste ad esperimenti che si svolgono in laboratori cosmici, e può contribuire al progresso della fisica. Gli acceleratori di particelle cosmici hanno potenza estremamente elevata. Come è noto positroni e mesoni μ furono scoperti prima di tutto su lastre esposte a raggi cosmici; tra i raggi cosmici si è annunciata la scoperta (peraltro discussa) dei quarks e dei monopoli magnetici.

Sullo scorcio del XVII secolo sono ormai pronti gli elementi per la seconda sintesi che incontriamo nella storia dell'astronomia, operata da Newton. Qui confluiscono le prime esperimentazioni meccaniche di Galileo, le leggi cinematiche di Keplero, le idee di Copernico. In piú, di suo, Newton aggiunge il calcolo

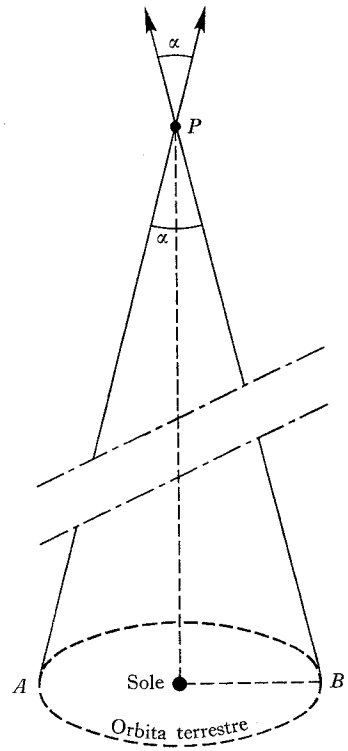


Figura 5.

La figura mostra la parallasse di una stella. Guardando la stessa stella da posizioni opposte dell'orbita terrestre (punti A e B) si individua un angolo (α in figura) la cui metà viene chiamata parallasse annuale della stella. Questo fu uno dei punti fondamentali su cui si basò per secoli tutta la critica alle teorie eliocentriche, infatti nessuno fino al 1838 fu capace di misurarla. Fu Henderson che nel 1838 riuscí infine ad osservarla per α-Centauri, la stella luminosa piú vicina alla Terra, stimandola in circa 0,8 secondi d'arco. Da notare che la parallasse di una stella è collegata alla sua distanza (quanto piú è distante la stella, tanto piú piccola è la parallasse) e permette di determinare direttamente la distanza di una stella, una volta nota la distanza media Terra-Sole. Il limite di questo metodo di determinazione delle distanze consiste nel fatto che pur con i moderni telescopi non si riesce ad apprezzare parallassi inferiori a 0,01″ e quindi non si riesce a determinare direttamente distanze delle stelle piú grandi di circa 10^2 volte quella di α-Centauri. Da notare infine che, proprio per la sua connessione con la distanza, la parallasse è usata per definire una unità di lunghezza astronomica, il parsec, che è appunto la distanza a cui per una stella si misura la parallasse di 1″.

infinitesimale, che non è poco: nascono quasi insieme la fisica moderna e l'analisi matematica. Ridotta *in nuce*, l'opera astronomica di Newton inizia con l'osservazione che la legge della caduta dei gravi di Galileo, la cui traiettoria è in generale una parabola, e le leggi di Keplero dei corpi celesti, le cui traiettorie sono delle ellissi, sono due casi particolari di una legge piú generale. Newton si domanda cioè che cosa succederebbe se il grave che cade fosse dotato di una velocità iniziale orizzontale sufficientemente grande. Se la Terra fosse piana, in ogni caso prima o poi arriverebbe al suolo, ma poiché la Terra è rotonda può succedere che, per cosí dire, al grave manchi la terra di sotto, cosí che esso continuerebbe a cadere senza mai arrivare al suolo. A questo punto Newton si chiede perché mai il grave debba cadere sulla Terra: la risposta aristotelica che il grave tende alla sua sfera non è piú valida, perché la rivoluzione copernicana ha eliminato la sfera del grave. A questa domanda, in fin dei conti, Newton non risponde: nel contesto delle sue leggi della meccanica, egli si limita a riconoscere l'esistenza di una forza di attrazione gravitazionale e a darne la legge.

Questo è quanto occorre e basta per spiegare il moto dei corpi celesti fin nei piú minuti dettagli: sarà il compito di due secoli di meccanica celeste, che continuerà a mietere successi basandosi su pochissima fisica e moltissima matematica, fino alla crisi finale del problema dei tre corpi, cioè la ricerca delle orbite e delle leggi orarie di tre corpi che si attraggono gravitazionalmente fra loro. I pianeti di Tolomeo dovevano portarsi appresso una collezione di dati iniziali: il numero e le dimensioni di epicicli e deferenti, le velocità con cui li percorrevano, le posizioni degli equanti. Ai pianeti di Newton bastano massa, posizione e velocità in un preciso momento: una sola osservazione sarebbe sufficiente per avere tutti i dati necessari in un colpo. Il progresso è enorme e lo si nota subito. Tuttavia, come non sapremmo dire ora con che criterio fossero distribuiti i pianeti tolemaici e «perché» i pianeti fossero costretti a seguire quelle orbite (domanda che però Tolomeo non intendeva porsi, perché già possedeva la risposta aristotelica), cosí oggi non si sa con certezza né in base a che criterio siano state distribuite masse, posizioni e velocità iniziali, né «perché» esista la gravitazione universale.

La fisica moderna mantiene una interessante attitudine riguardo a queste due domande: la prima è legittima, ma è compito delle teorie cosmogoniche risponderle; la seconda è legittima, ma nell'ambito delle moderne teorie dei campi: nessuna delle due è legittima nell'ambito della meccanica celeste e viene qualificata in questo ambito come «metafisica». Vediamo cioè che nei vari campi della fisica la conoscenza si sviluppa fissando un certo insieme di principî fondati sull'esperienza, e di deduzioni logiche e matematiche che illustrano piú il «come» che il «perché». Da queste deduzioni non si può ricavare nulla che ci illumini sui principî: solo quando questi ultimi saranno ridotti a deduzioni di una differente teoria, a sua volta basata su altri principî, avremo aumentato le nostre conoscenze al loro riguardo. Ma in generale questa superteoria si presenta in modi del tutto imprevedibili: tale almeno è la nostra esperienza a trecento anni da Newton. Quanto a lui, si rendeva bene conto dei limiti dei compiti che la fisica si impone e che abbiamo appena enunciato: mentre abbonda-

vano ingegnosi modelli meccanici per dar ragione della attrazione gravitazionale, Newton rifiutava costantemente di formulare ipotesi.

Mentre dunque cosí si affaticavano i metafisici (potremmo dire inutilmente, non avendo i mezzi sufficienti, né matematici né fisici), la maggior parte degli astronomi seguiva inizialmente le due vie aperte. La prima, già accennata, consiste nello sviluppo della meccanica celeste. I corpi piú studiati sono pianeti e comete, e l'avverarsi di un ritardo di tre mesi nell'arrivo della cometa di Halley (1759) serví da un lato a smitizzare le comete, dall'altro a far trionfare la meccanica celeste. Questa via continua attraverso tutto il secolo XIX, culminando con l'aneddoto anche troppo raccontato della scoperta di Nettuno da parte di Adams e di Leverrier. Il resto del secolo vede la meccanica razionale e celeste impegnata a cercare vie nuove fino al già accennato scontro finale col problema dei tre corpi. I teoremi di Bruns e Poincaré sembrano precluderne la soluzione perché escludono l'esistenza di integrali primi algebrici, o, piú in generale, periodici e ad un sol valore, oltre a quelli già noti ed insufficienti alla soluzione. Le ricerche successive di meccanica celeste su questo problema prenderanno dopo Poincaré tutt'altra direzione.

C'era un altro risultato in conflitto con le predizioni della meccanica celeste alla fine del secolo scorso: dei circa cinquemila secondi per secolo del movimento di spostamento del punto piú vicino al Sole (perielio) dell'orbita del pianeta Mercurio, la meccanica celeste non riesce a spiegarne circa l'uno per cento. È poco, ma sarà uno dei trionfi della relatività generale lo spiegare anche quest'ultima discrepanza.

3. *L'apporto della tecnologia e le nuove osservazioni.*

L'altro filone di ricerca dell'astronomia sette-ottocentesca è l'osservazione del cielo con nuovi strumenti. Qui la tecnica si perfeziona, e gli astronomi di quel periodo si gettano con ardore su questo terreno ancora vergine. Il compito piú immediato sembra la verifica dei risultati teorici con l'osservazione dei corpi del sistema solare, ma c'è anche un notevole interesse per le stelle, che domineranno l'astronomia ottocentesca, grazie soprattutto al sorgere dell'astronomia fisica, e della spettroscopia in particolare. E già si profila una ancor scarsa popolazione di oggetti differenti con cui bisognerà fare i conti prima o poi. Messier, nel 1771, pensa di pubblicare un catalogo di centotre oggetti non stellari che a prima vista potrebbero essere presi per comete, confondendo cosí gli studiosi di queste ultime. Al primo posto pone una nebulosa di nona grandezza che, qualche anno prima, gli ha dato particolare fastidio nella citata osservazione della cometa di Halley del 1759. Cosí entra nell'astronomia la nebulosa del Granchio (Crab Nebula).

È forse difficile dare al non addetto ai lavori un'idea della importanza straordinaria di questo oggetto, invisibile ad occhio nudo, e ad una distanza di circa seimila anni luce. La nebulosa del Granchio, scoperta nel 1731, aveva già un passato, e si preparava ad un futuro notevole, come banco di prova per un gran

numero di teorie astrofisiche. Quanto al passato, la Crab doveva essere stata una supernova esplosa nel 1054 e per qualche tempo visibile di giorno. Recenti scoperte di documenti di astrologi cinesi, e di graffiti amerindi (questi un po' piú controversi), sembrano confermarlo. Rimane lo strano fatto che né Europei né Arabi la osservarono. Se per gli Europei si sono trovate sbrigative spiegazioni che attribuiscono la mancata osservazione ad un influsso negativo della Chiesa, per gli Arabi non ci sono però risposte. Possiamo accennare alla storia successiva: la Crab è un'intensa sorgente di radiazione praticamente a tutte le frequenze, il meccanismo che produce la radiazione è dovuto all'interazione di elettroni col campo magnetico (radiazione di sincrotrone). Inoltre la Crab possiede nel suo interno la pulsar con il piú breve periodo (33 millisecondi), visibile anche in ottico ed in X, e probabile sorgente degli elettroni necessari per il meccanismo di sincrotrone. Naturalmente la Crab non è sola nel catalogo di Messier. Oltre ad un certo numero di sistemi stellari ed altre nebulosità galattiche c'è una maggioranza di nebulose extragalattiche, futuri protagonisti dell'astronomia. Ma questi concetti sono ancora da venire e li esporremo altrove. Comunque con Messier il problema è posto, anche se male: la crisi si profila, il ricambio è assicurato. Già Herschel inizia l'osservazione di questi oggetti su vasta scala.

È Laplace, nella sua *Exposition du Système du Monde* (1796), che, illustrati i principali risultati dell'astronomia del tempo, si azzarda ad assegnare i compiti dell'astronomia futura. È interessante riportarli tenendo presente il momento storico in cui Laplace operava. Lo scopo sarà anzitutto lo studio dei moti delle stelle e delle loro parallassi (l'unico metodo allora noto per determinare le distanze stellari). In secondo luogo si dovranno studiare le variazioni periodiche delle stelle variabili, e si dovrà fare un catalogo delle stelle che appaiono ad intermittenza. Inoltre si dovranno studiare i cambiamenti di forma delle nebulose ed in particolare Orione. Qui occorre notare che Laplace, indulgendo all'illusione evolutiva, sperava che si potesse dimostrare che queste nebulose non erano altro che diverse fasi della formazione di immensi sistemi stellari simili alla nostra Via Lattea secondo la sua nota teoria: precorrendo i tempi Laplace credeva in un universo popolato da isole di stelle, come in sostanza crediamo ora. Per conseguire gli scopi indicati, continua Laplace, occorre perfezionare gli strumenti ottici (e si aspetta grandi cose dai nuovi progressi nella costruzione delle lenti) oltre che gli strumenti di misura degli angoli e del tempo. Anche il sistema solare, tuttavia, può ancora presentare interesse: si potranno scoprire altri pianeti, pianetini e comete; si potranno perfezionare i calcoli perturbativi che permetteranno di scoprire le influenze reciproche tra i corpi celesti piú distanti. Infine Laplace indica uno scopo pratico per l'astronomo, cioè l'intervento nei problemi geodetici, ed uno scopo fisico, cioè la misura della resistenza dell'etere al moto dei pianeti. Su queste premesse è interessante analizzare il successivo sviluppo dell'astronomia ottocentesca, infinitamente piú grandioso di quello che Laplace stesso si aspettava: due cose soprattutto non era in grado di prevedere, cioè l'impatto della spettroscopia, e l'avvento della fotografia. È dunque ragionevole concludere che è assai difficile prevedere ed ancor piú programmare la ricerca di base su scale di tempi abbastanza lunghe: se Laplace

fallí su tempi dell'ordine di cinquant'anni, è lecito pensare che il vertiginoso progresso della scienza e tecnologia moderne dovrebbe vanificare previsioni su scale di cinque anni ed anche meno. Tuttavia è da sottolineare che Laplace fa anche una previsione di tutto rispetto affermando che nell'universo possono esistere innumerevoli corpi oscuri, perché una stella con un raggio duecentocinquanta volte maggiore di quello solare e densità uguale a quella terrestre sarebbe un corpo oscuro. Essa infatti non permetterebbe alla luce di uscirne, luce che evidentemente Laplace ritiene costituita di corpuscoli dotati di massa. Questa conclusione non viene sostanzialmente modificata dalla relatività generale ed è la piú antica affermazione dell'esistenza dei «buchi neri», la cui osservazione, ancora incerta, è un fatto recentissimo.

È soprattutto nel caso dell'applicazione della fotografia all'astronomia che si ha un esempio della difficoltà di prevedere gli sviluppi futuri nella ricerca scientifica e di come l'applicazione di particolari tecnologie a volte ponga in secondo piano fenomeni molto importanti per la comprensione della natura. La fotografia è una tecnologia essenzialmente ottocentesca, a partire dai primi dagherrotipi (1839). Il progresso è rapido: le prime lastre colloidali (1850) richiedono tecniche ed attenzioni particolari, nonché lunghi tempi di esposizione e sviluppo. Intorno al 1880 si diffondono le prime lastre asciutte veloci e per il 1900 è già stata fotografata la maggior parte dei pianeti, satelliti, comete, asteroidi. Si credeva infatti che il sistema solare sarebbe stato il maggior campo di applicazione della fotografia: delle stelle si sapeva che sarebbero comunque apparse come punti privi di struttura. Né bisogna dimenticare che ferveva a quel tempo la polemica riguardo alla vita su altri pianeti, in gran parte dovuta all'annuncio dato dallo Schiapparelli della scoperta dei canali su Marte (1877), poi visti da alcuni e non visti da altri: la fotografia avrebbe dovuto fornire una visione oggettiva ed indiscutibile. Inizialmente fu una delusione, perché la fotografia elimina i contrasti netti. Ma quando la macchina fotografica fu puntata sulla cometa del 1882 si trovò che la maggior sorpresa era fornita dal grande numero di stelle che apparivano nella fotografia. Dunque, il vantaggio maggiore era costituito dai lunghi tempi di raccolta della luce: stelle e strutture praticamente invisibili potevano essere rivelate per mezzo di lunghe esposizioni. Questa scoperta però, oltre a consentire progressi notevoli, creò anche una specie di blocco mentale, da cui solo recentemente gli astronomi sembrano essersi liberati: l'interesse per forme visibili solo con lunghi tempi di raccolta fece passare in seconda linea l'interesse per fenomeni che si svolgevano su scale di tempi brevi o brevissimi.

Solo negli ultimi tempi la ricerca astronomica volta a rivelare fenomeni celesti che si svolgono su una breve scala di tempo ha ricevuto particolare impulso. A questo hanno cooperato diversi metodi di indagine, e se ne è dedotto che esistono fenomeni di tutte le durate, fin dalle piú brevi rivelabili e praticamente in tutte le bande d'onda. Ricordiamo brevemente gli oggetti che appartengono a questa classe di fenomeni.

Tra le decine di millisecondi e i secondi troviamo la maggior parte delle pulsar, oggetti che emettono un segnale radio periodico di assoluta regolarità.

La loro scoperta (1968) creò una risonanza notevole ed in breve tempo il loro studio divenne l'argomento di punta, per teorici e sperimentali. I risultati non sono forse stati quelli sperati, e negli ultimi anni non c'è stato un reale progresso. Tuttavia si è raggiunto un certo numero di conclusioni generalmente accettate (che si tratti di stelle a neutroni, ruotanti rapidamente e circondate da un intensissimo campo magnetico) e si è dato un notevole sviluppo a nuovi campi dell'astronomia.

Meno si conosce degli impulsi in raggi γ, della durata dell'ordine di secondi, rivelati a partire dal 1971 per mezzo di satelliti americani il cui scopo era del tutto differente, cioè le segnalazioni di esplosioni nucleari artificiali terrestri. A parte una fenomenologia abbastanza ricca, non si conosce praticamente altro: in particolare ne è totalmente ignoto il tipo di sorgente.

Stelle che pulsano su scale di tempo piú lunghe sono recentemente state osservate. Un buon numero di nane bianche (probabilmente resti dell'esplosione di una nova) hanno periodi osservabili otticamente che spaziano dalle decine alle centinaia di secondi.

Sono stati osservati anche fenomeni sporadici con queste stesse scale di tempo: le esplosioni (*flares*) sul Sole e sulle stelle, rivelabili a varie lunghezze d'onda, ed attualmente studiate fenomenologicamente (sebbene poco comprese teoricamente) cadono in questo intervallo di tempo.

Di esplosioni sporadiche e piú o meno regolari, che interessano una frazione anche notevole della stella, ce ne sono in pratica di ogni durata, dai minuti ai giorni. Su queste scale di tempo si osservano anche le Cefeidi, stelle luminose che manifestano regolari variazioni di luminosità: dopo i primi tentativi di spiegazione in termini di stelle binarie, si venne alla conclusione che si trattava di stelle pulsanti. Nel 1921, osservando la Piccola Nube di Magellano, fu scoperta una relazione fra il periodo della pulsazione e la luminosità intrinseca. Le conseguenze di questa relazione sono notevoli sul piano cosmologico piú che su quello astronomico. È chiaro infatti che dall'osservazione del periodo di una stella, e dal flusso luminoso misurato sulla Terra, se ne può dedurre la distanza. Si è cosí potuta creare una scala di distanze almeno per le galassie piú vicine, che è stata poi estesa ad oggetti piú distanti con altri metodi, e ci ha permesso di valutare le dimensioni del nostro universo.

Esistono poi le novae e le supernovae, che si manifestano con esplosioni su scale di tempo di qualche decina di giorni. Anch'esse presentano una certa uniformità nella luminosità intrinseca massima, per cui anch'esse possono servire per misurare la distanza dalla Terra di galassie ed ammassi di galassie.

Su scale di tempi variabili dal giorno al milione d'anni abbiamo la vasta gamma delle stelle binarie, che si presentano con grande molteplicità di fenomeni. Hanno un periodo di qualche giorno le binarie X, in cui probabilmente uno dei componenti è una stella a neutroni. Vi sono poi binarie costituite da stelle ordinarie a tutte le distanze, e con i periodi piú disparati.

4. *Il diagramma di Hertzsprung-Russell.*

La sintesi della astrofisica stellare ottocentesca viene compiuta all'inizio del XX secolo. Essa assume l'aspetto del diagramma di Hertzsprung-Russell e delle sue successive versioni, da un lato compendio delle osservazioni e dall'altro anticipazione di problemi futuri. Vorremmo discuterlo in dettaglio, vista la sua importanza fondamentale per comprendere il mondo in cui si muove l'odierno astrofisico stellare.

In generale si possono costruire diagrammi che mettono in relazione due (o piú) parametri scelti a caso tra quelli misurabili in una stella; ovviamente, visto che la Terra non occupa una posizione privilegiata, bisogna anzitutto scegliere dei parametri assoluti, cioè parametri in cui non entri la distanza dalla Terra. La luminosità intrinseca si pone subito come candidata. Il secondo parametro può essere il colore, quantitativamente rappresentato da un «indice di colore», o la classe spettrale, empiricamente determinata in base alle caratteristiche dello spettro della stella in esame, o infine un parametro fisico, la temperatura effettiva. Questi tre parametri, nella ipotesi che lo spettro di emissione stellare approssimi un corpo nero, sono legati fra loro. Già Leonardo aveva osservato che il colore di un metallo va dal rosso cupo all'arancio al giallo, aumentando la temperatura. Inoltre basta una modesta conoscenza della fisica moderna per ricordare che a basse temperature si possono conservare inalterate le molecole, e quindi se ne vedranno le caratteristiche bande negli spettri stellari. A temperature piú alte esse vengono distrutte da collisioni abbastanza violente, mentre si possono ancora osservare le righe atomiche. Aumentando ancora la temperatura gli atomi vengono ionizzati e le righe caratteristiche degli atomi scompaiono gradatamente.

In realtà si potrebbe pensare ad altri parametri in linea di principio indipendenti da quelli citati precedentemente; ad esempio, massa e raggio della stella. Tuttavia il problema della scelta non si poneva neppure all'inizio di questo secolo, perché le stelle di cui si poteva dedurre la massa erano assai poche, e quelle di cui si conosceva il raggio erano una o due. Costruendo dunque il diagramma luminosità - temperatura effettiva si osservò che i punti rappresentativi delle stelle non occupavano uniformemente tutto il piano a disposizione, ma solo certe regioni abbastanza ristrette. Si veda a questo proposito il diagramma in figura 6. La regione piú popolata di stelle, che attraversa diagonalmente il diagramma (SP), è detta sequenza principale. Il fatto che si tratta di una regione allungata significa che c'è una relazione abbastanza ben definita che intercorre fra luminosità e temperatura: fissata la luminosità si può conoscere la temperatura e viceversa. Tuttavia non mancano stelle con altre caratteristiche. Si veda l'isola delle nane bianche (NB), stelline poco luminose e di alta temperatura, e l'isola delle giganti rosse (GR), molto luminose e di bassa temperatura. Con l'aumentare delle osservazioni il diagramma si arricchisce: si nota che le stelle che ne occupano diverse regioni hanno notevoli caratteristiche comuni. Fra esse ci sono le supergiganti blu (SB) e rosse (SR), le stelle T-Tauri (i cui spettri mostrano un eccesso nell'infrarosso e delle linee di emissione, mentre la maggior parte delle stelle mostra solo linee di assorbimento), le stelle variabili regolari (VR), fra cui le Cefeidi, che mostrano alti e bassi periodici di luminosità, le variabili irregolari (VI) che mostrano sporadiche variazioni di luminosità, con diverse intensità e scale dei tempi; tra queste ultime vi sono le stelle di Wolf-Rayet, che pure mostrano linee di emissione e probabilmente sono circondate da uno strato di gas in espansione. Infine abbiamo le stelle magnetiche, circondate da campi magnetici fino a trentamila volte il campo magnetico terrestre (misurato alla superficie della Terra ed alle nostre latitudini).

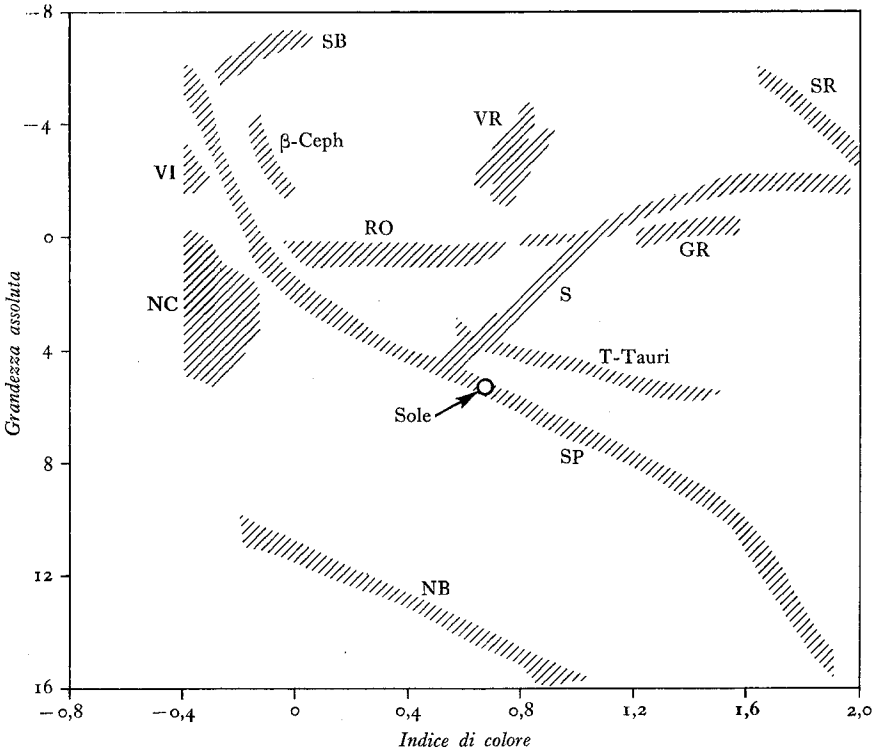


Figura 6.

Diagramma di Hertzsprung-Russell. L'indice di colore corrisponde alla temperatura superficiale della stella, la grandezza assoluta alla sua luminosità intrinseca; la prima cresce verso sinistra, la seconda verso l'alto.

Qui abbiamo intanto implicitamente accennato a due tipi di osservazioni che permettono di dedurre, rispettivamente, l'espansione di una stella, o la presenza di un intenso campo magnetico. Questi risultati, in fin dei conti sensazionali, possono essere ottenuti grazie a due meccanismi fisici fondamentali:

l'effetto Doppler, che prevede lo spostamento delle linee spettrali a seconda delle velocità rispetto a noi della regione che le produce, e l'effetto Zeeman, che prevede che una linea spettrale emessa da un atomo in un campo magnetico si spezzi in un numero preciso di componenti la cui separazione reciproca fornisce direttamente una misura dell'intensità del campo magnetico.

Come abbiamo detto, il diagramma di Hertzsprung-Russell pone all'astronomo in modo globale il problema dell'interpretazione e delle relazioni fra i vari tipi di stelle di cui abbiamo dato una sommaria descrizione. Qui l'ipotesi evolutiva ci può venire in aiuto per semplificare il panorama: si può supporre per incominciare che tutte o una gran parte di queste stelle rappresentino diverse fasi nello sviluppo di un unico oggetto. Nessuno in realtà crede ad un'ipotesi cosí semplicistica: si ammette cioè che ci sia una qualche differenza iniziale fra gli oggetti che diventeranno poi le stelle della sequenza principale. Tuttavia queste differenze possono essere ridotte al minimo: basta cioè assegnare una massa iniziale, ed una composizione iniziale, riassunta nei tre parametri X, Y, Z, che stabiliscono il contenuto percentuale di idrogeno, elio ed elementi pesanti, per spiegare una grande varietà di forme del diagramma di Hertzsprung-Russell. Si delineano cosí i problemi generali dell'interpretazione: in primo luogo si deve spiegare come vengono assegnate massa e composizione iniziale; in secondo luogo si deve predire l'evoluzione di questi oggetti su una complicata traiettoria sul diagramma di H-R; infine si deve studiare lo stato finale. È chiaro che gli addensamenti nel diagramma H-R corrisponderanno agli stati evolutivi in cui le stelle passano la maggior parte del tempo: se le stelle di una certa massa e composizione iniziale passano, diciamo, il 90 per cento del loro tempo in uno stato con una certa luminosità e temperatura, ciò significa che circa il 90 per cento delle stelle *osservate* con quella massa dovrà avere quella speciale luminosità e temperatura.

Dei problemi sopra indicati possiamo dire subito che il primo, quello dell'assegnazione dei parametri iniziali, è sostanzialmente non risolto a tutt'oggi: esistono teorie che arrivano a spiegare la formazione di ammassi di materia, eventualmente sferici, di massa diecimila volte quella del Sole, ma non c'è una teoria realmente attendibile che ne spieghi l'ulteriore frammentazione in uno spettro di massa paragonabile a quello osservato. Per quanto riguarda il secondo problema, esisteva intorno al 1920 una difficoltà essenziale, in quanto era ignota la sorgente di energia delle stelle. L'argomento è semplice: se si suppone che il Sole sia un'immensa massa composta del combustibile chimico piú efficiente noto a quel tempo, si può calcolare subito quanto durerebbe, dividendo l'energia totale sprigionabile per combustione per l'energia liberata per secondo, che non è altro che la luminosità. Facendo questo calcolo si trovava che la vita del Sole era troppo breve, paragonata ad evidenze geologiche e paleontologiche sull'età della Terra. Tuttavia questo problema è stato risolto grazie alla scoperta delle reazioni nucleari, che producono energia assai piú efficientemente di qualsiasi reazione chimica, come la combustione. Si tratta proprio di quelle reazioni di fusione di nuclei leggeri in nuclei piú pesanti che, si spera, risolveranno un giorno il problema energetico terrestre, ma che finora si sono rivelate come una

Fata Morgana. Questo ad ogni modo era l'unico dato mancante per la costruzione di modelli stellari. Il problema diviene a questo punto puramente matematico: assegnate le equazioni costitutive ed i parametri iniziali, calcolare l'evoluzione della stella. Naturalmente i calcoli possono essere raffinati e complicati all'estremo: esistono diversi modelli proposti da diversi gruppi, che hanno pregi e difetti particolari, e che richiedono comunque lunghissimi tempi di calcolo degli elaboratori piú veloci. Pure nell'incertezza di determinate ipotesi e nella grossolanità delle approssimazioni, le caratteristiche salienti della sequenza principale possono essere riprodotte anche dai modelli piú rozzi, in accordo sostanziale con le osservazioni: in particolare si ottengono una relazione fra luminosità e temperatura effettiva, una seconda relazione fra massa e raggio, ed una terza fra massa e luminosità. Quest'ultima relazione in particolare afferma che la luminosità è proporzionale, grosso modo, al cubo della massa, cioè una stella che ha una massa decupla di un'altra, ha una luminosità mille volte piú grande. Grazie a questo sostanziale accordo fra modelli possiamo dire paradossalmente di sapere di piú sull'interno di Sirio, una stella alquanto distante, che sull'interno della nostra Terra.

Una conseguenza della relazione fra massa e luminosità è che le stelle di massa piú grande esauriscono piú in fretta le loro riserve nucleari, cioè abbandonano prima la sequenza principale e raggiungono prima lo stato finale. Possiamo allora schematizzare in figura 7 le fasi dell'evoluzione stellare cosí come sono intese ora. Dapprima si formano in qualche modo delle masse di gas di data composizione. Queste, sotto l'attrazione gravitazionale collassano, cioè cadono su se stesse, tanto piú in fretta quanto piú alta è la loro massa. Questa contrazione termina quando la loro temperatura interna come conseguenza della caduta è abbastanza alta da innescare le reazioni nucleari. A questo punto la stella è, per cosí dire, atterrata sulla sequenza principale e, come si è detto, vi resterà per la maggior parte della sua vita, fino a che non avrà esaurito una discreta percentuale (che risulta di circa il 13 per cento) delle sue riserve nucleari: il che richiederà un tempo tanto minore quanto piú alta è la sua massa. La stella allora abbandonerà la sequenza principale seguendo, secondo i modelli, una traiettoria come quella indicata in figura 7, cioè delle rapide peregrinazioni sul piano H-R, diretta verso il suo stato finale. Già si può indicare almeno in linea di principio una elegante applicazione di questa teoria per definire l'età di un ammasso stellare: basterà infatti riportare su grafico il diagramma H-R per un gran numero di stelle dell'ammasso. Dovremmo trovare che tutte le stelle al di sotto di una certa massa giacciono sulla sequenza principale, e tutte quelle al di sopra se ne discostano. Le stelle che, per cosí dire, stanno per lasciare la sequenza principale definiscono l'età dell'ammasso, poiché conosciamo dalla teoria il tempo che verrebbe da loro trascorso sulla sequenza principale, e questo tempo, evidentemente, sta per scadere.

Continuando nell'evoluzione stellare, comincia a rendersi interessante la domanda: «Qual è lo stato finale delle stelle?» Sul diagramma di H-R parrebbe che una buona parte delle stelle, lasciato il cosiddetto ramo orizzontale (RO in figura 6), rapidamente divenga la stella centrale di una nebulosa planetaria,

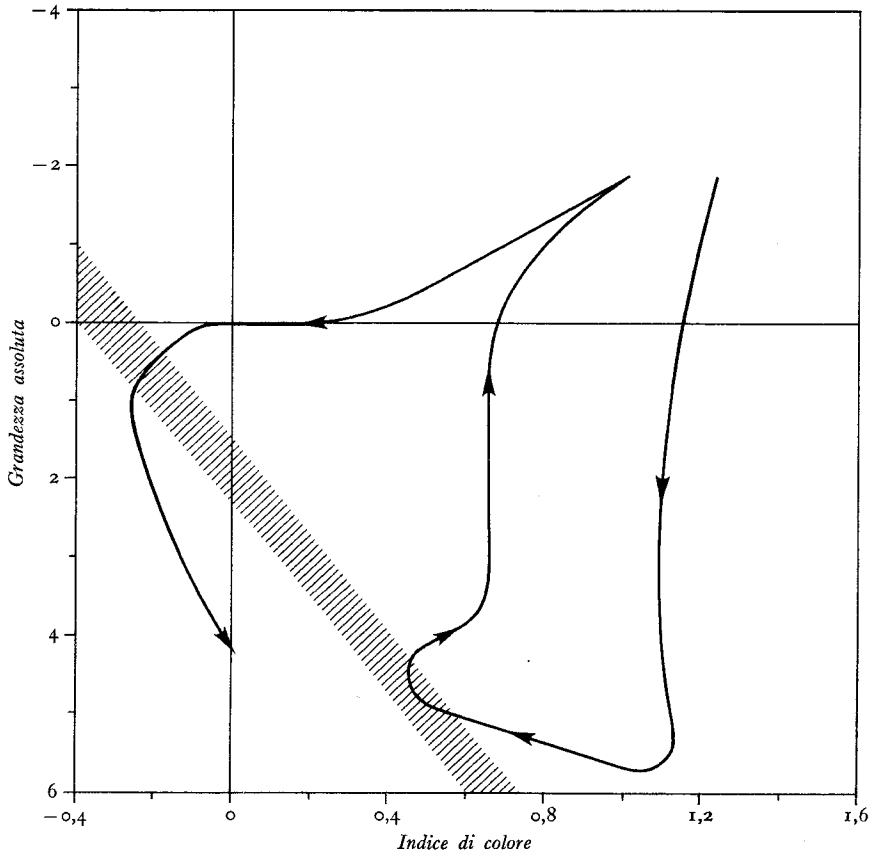


Figura 7.

Probabile evoluzione di una stella con massa leggermente piú grande di quella del Sole. La zona ombreggiata rappresenta la sequenza principale. Sulle ascisse sono riportate le stesse quantità della figura 6.

e poi, finalmente, una nana bianca. Le teorie dell'evoluzione stellare però non prevedono la stessa fine per tutte le stelle. Secondo le vedute moderne, la stella, bruciate tutte le sue risorse nucleari, non può piú opporre una pressione termica all'attrazione gravitazionale, e riprende il suo collasso. Tuttavia insorge una serie di ostacoli sulla via della contrazione: anzitutto interviene il fenomeno della degenerazione degli elettroni.

Al diminuire delle dimensioni di una stella, gli atomi incominciano a comprimersi, e le orbite elettroniche a confondersi. Gli atomi quindi finiscono col perdere la loro identità, di modo che la materia che costituisce la stella sarà

data infine da nuclei ed elettroni indipendenti. Ciò avviene in condizioni normali, almeno per gli elettroni degli strati atomici piú esterni, nei metalli: la materia di una nana bianca può essere quindi paragonata ad un metallo. Ma interviene un effetto anche piú notevole. Nella continua perdita di energia per raffreddamento, gli elettroni, se si comportassero secondo le leggi della meccanica classica, dovrebbero alla fine occupare il livello d'energia piú basso. Tuttavia uno dei principî fondamentali della meccanica quantistica, dovuto a Pauli, afferma che in ogni livello di energia non possono essere sistemati piú di due elettroni. Il prossimo livello inoltre, per altro effetto quantistico, non avrà energia vicina quanto si vuole al precedente, ma ne sarà separato da un intervallo finito. Se dunque vogliamo sistemare un grandissimo numero di elettroni nello stato globale di minima energia, troviamo che, a causa dei due effetti indicati, ci saranno elettroni con energia (e quindi temperatura) altissima, perché i livelli inferiori sono tutti occupati. Però questi elettroni ad altissima energia non possono irradiare energia elettromagnetica, perché irradiare significa perdere energia, e perdendo energia essi dovrebbero cadere ad un livello piú basso, che, come abbiamo detto, è già occupato. La grande energia di «degenerazione» che cosí diventa disponibile può arrestare per sempre il collasso gravitazionale, se la massa della stella è inferiore a circa una volta e mezzo la massa del Sole.

In tal caso la stella ha raggiunto il suo stato finale, e può sussistere «imbalsamata» fino a nuovo ordine. La nana bianca si presenta dunque come una stellina delle dimensioni della Terra, di altissima densità e bassa luminosità, dovuta ad una sottile atmosfera non degenere. Se ne conoscono alcune centinaia tra le piú vicine, ma ce ne devono essere assai di piú: recentemente si è scoperto che alcune presentano intensissimi campi magnetici, ed altre fluttuazioni periodiche di luminosità dell'ordine di qualche decina di secondi. Nei casi in cui la stella riprende il collasso, trova un secondo intoppo: ora nuclei ed elettroni incominciano per cosí dire a penetrare gli uni negli altri, fino a che la stella è formata di neutroni. Le sue caratteristiche non sono piú quelle di un metallo, ma di un gigantesco nucleo atomico, del diametro di qualche chilometro e densità ancora maggiore che nel caso precedente. I neutroni producono una nuova energia di degenerazione che, nei casi fortunati, può arrestare il collasso. Quando si proposero questi oggetti come stato finale di gran parte delle stelle, le speranze di osservarli erano minime. Il progresso della X-astronomia intorno al 1960 diede qualche illusione di poter rivelare una emissione continua. Tuttavia nel 1968 si incominciò ad osservare impulsi radio ad intervalli estremamente regolari, da qualche centesimo di secondo a qualche secondo, provenienti da sorgenti che furono chiamate pulsar. Il combinarsi di circostanze impreviste che porta all'esistenza delle pulsar è notevole. Come già accennato, il modello corrente afferma che le pulsar sono stelle a neutroni, rapidamente rotanti, dotate di altissimo campo magnetico, e capaci di iniettarvi gli elettroni responsabili della radiazione osservabile. I particolari del meccanismo non sono né chiari né accettati da tutti, ma è uno dei dogmi dell'astrofisica attuale che le pulsar sono stelle a neutroni magnetiche e rotanti. Pochi anni dopo furono segnalate le prime stelle pulsanti X, anch'esse interpretate come stelle a neutroni in rapida

rotazione. Qui però la situazione è piú complessa: queste stelle fanno parte di un sistema binario e la radiazione è prodotta da materia che cade dalla stella piú grande su quella piú piccola. In tutto possiamo dire oggi di avere sotto osservazione un centinaio di stelle a neutroni. Resta ancora la possibilità che la massa della stella sia abbastanza alta da continuare il suo collasso in ogni caso. A questo punto la stella non ha piú risorse, e deve inevitabilmente contrarsi indefinitamente, a meno di liberarsi precedentemente di gran parte della massa. L'opinione corrente è che la maggior parte delle stelle diventi un corpo collassato, cioè un «buco nero», ed è nata una letteratura, ai limiti della fisica, che ne studia o ne ipotizza le condizioni. Si sono anche proposti alcuni candidati: il piú probabile sembra essere la sorgente nota agli astronomi X come Cigno X-I.

5. *Le nuove astronomie.*

Queste sono piú o meno le idee che gli astronomi hanno oggi sulla struttura e sull'evoluzione delle stelle; ad esse ha portato un essenziale contributo lo sviluppo di tutta una serie di tecnologie che ha permesso l'osservazione del cielo in bande dello spettro di frequenze (cfr. fig. 8) diverse da quelle caratteristiche dell'ottico. Di tutte le nuove astronomie non ottiche che si sono di conseguenza sviluppate, solo la radioastronomia ha potuto portare un contributo paragonabile a quello dell'astronomia tradizionale. Le limitazioni che gravano sull'astro-

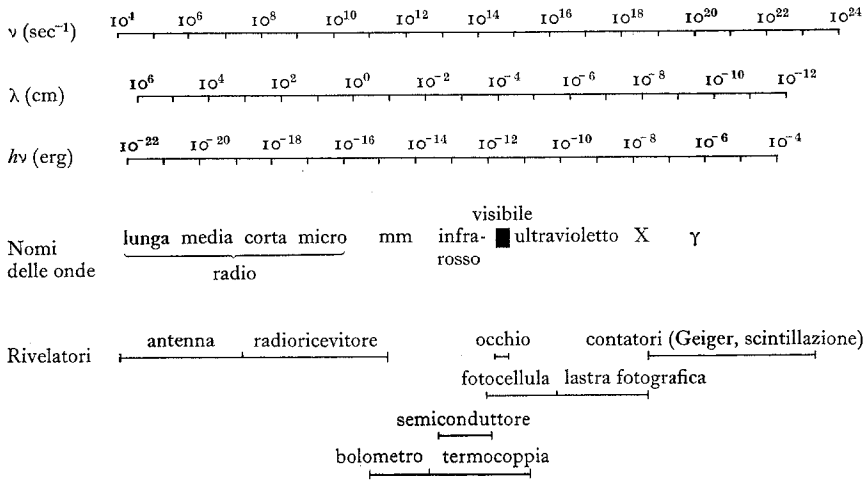


Figura 8.

La figura mostra la conversione tra frequenza, lunghezza d'onda ed energia della radiazione elettromagnetica. Sono inoltre indicati i nomi con cui le varie bande dello spettro vengono chiamate ed i rivelatori usati dagli astronomi, adatti a ciascuna banda.

nomia X e γ, ultravioletta ed infrarossa, le costringono a svolgere per il presente una parte di secondo piano, anche se indubbiamente importante. Si pensi che il primo satellite interessato alla rivelazione di raggi γ di circa 100 MeV rivelò poche centinaia di fotoni in due anni di funzionamento. Quanto alle sorgenti X, esse sono per ora poco piú di cento. Se si paragona questo numero al numero di stelle nel catalogo HD (circa 300 000) si vede la sproporzione dei due campi. Il futuro delle branche di astronomia X e γ, che si basano su osservazioni fuori dell'atmosfera, è legato a diverse questioni di diversa indole. Lo sviluppo futuro può essere cosí delineato: restano da esaminare praticamente la gamma di energia intorno ad 1 MeV, ed inoltre le linee spettrali e la polarizzazione. In certo senso siamo in una era prespettroscopica, per la mancanza di opportuni strumenti. Cominciano invece ad apparire le prime rozze immagini a raggi X. Oltre ai rivelatori occorre però che si perfezionino altri aspetti tecnologici essenziali per una buona riuscita di queste osservazioni, quali precisi sistemi di puntamento automatico, e piú veloci sistemi di trasmissione di dati a Terra. Infine occorre che siano costruiti e lanciati veicoli spaziali adeguati. Dopo le riuscite missioni Apollo sulla Luna si è notato un minore interesse a spese di questo tipo. Mentre si cerca con difficoltà di condurre in porto progetti già vecchi, non si mettono in cantiere nuove proposte, e sembra di poter prevedere una futura contrazione della ricerca spaziale, almeno fino a che non verranno lanciate le stazioni orbitanti intorno alla Terra.

Questi problemi di un precario futuro immediato non sono condivisi dalla radioastronomia, che può compiere da Terra le sue osservazioni. La scoperta dell'emissione radio dal cosmo fu del tutto casuale e vide impegnati pochi dilettanti. Verso il 1940 si era concluso che le stelle, compreso il Sole, ordinariamente non presentano emissioni radio, e che esistono tre intense sorgenti, battezzate Cigno A, Cassiopea A, e Sagittario A. Altri interessi e le vicende belliche tennero le prime scoperte nascoste alla comunità astronomica fino al secondo dopoguerra. Durante la guerra stessa però si compivano due importanti progressi. In primo luogo, violenti disturbi ai sistemi radar inglesi nel febbraio 1942 rivelarono che il Sole era capace di una intensa emissione radio sporadica. In secondo luogo, nell'Olanda occupata Oort assegnava al suo collaboratore Van de Hulst il compito di studiare se esistevano linee spettrali rivelabili con metodi radio. Diverse righe furono proposte: la piú importante, a 21 cm, appartiene ad una estremamente poco probabile transizione dell'idrogeno. Tuttavia la sua rarità non ha impedito di utilizzarla per costruire mappe della distribuzione dell'idrogeno nella Galassia ed in altri sistemi stellari. A partire dal 1947 il mondo ha visto una gigantesca proliferazione di radiotelescopi: dapprima furono compiute delle indagini generali volte a costruire cataloghi di sorgenti celesti; poi si passò allo studio dettagliato di sorgenti speciali. A questo riguardo ricordiamo che quanto piú grandi sono le dimensioni massime del sistema, tanto migliore è la risoluzione ottenibile. Inoltre due telescopi lontani migliaia di chilometri che lavorino insieme possono essere considerati come parte di un unico sistema ricevente, e possono raggiungere in linea di principio risoluzioni superiori a quelle ottenibili con mezzi ottici. È questo il programma della VLBI

(Very Long Baseline Interferometry), che per ora ha dato solo risultati preliminari, ma che può rendere ancora piú importante il contributo di questo recente ramo dell'astronomia.

6. *Una possibilità stimolante.*

Vorremmo accennare infine ad un ultimo tipo di ricerca a cui l'astronomia può dare un notevole contributo. Ci riferiamo alle comunicazioni con civiltà extraterrestri. Di questo problema già da tempo si è impadronita la fantascienza, con la conseguenza di renderlo piuttosto repellente agli occhi della scienza ufficiale. Cosí il direttore dell'osservatorio di Jodrell Bank rifiutò come suggerita da due pazzoidi la proposta di ricercare segnali artificiali dallo spazio, senza rendersi conto che si trattava di due eminenti fisici.

Tuttavia la questione esiste e, soprattutto in considerazione delle quasi inimmaginabili conseguenze che una tale scoperta potrebbe produrre, vale la pena di parlarne. Stime dovute a vari studiosi indicano che probabilmente una stella su un milione è in grado di consentire una vita intelligente. Ciò significa che ci sono grosso modo due probabilità su tre che la piú vicina civiltà extraterrestre si trovi entro un centinaio di parsec. Intanto, perché cosí poche stelle sono candidate? La vita è un fenomeno estremamente complesso che richiede (almeno per come noi la concepiamo) lungo tempo per evolversi e condizioni piuttosto speciali. Ad esempio la temperatura deve essere costante fra circa 270 e circa 370 gradi assoluti: la nostra vita è basata sull'acqua che gela e bolle appunto intorno a queste temperature. Le temperature possibili invece vanno da zero gradi assoluti a qualche milione all'interno delle stelle. Inoltre dalla prima comparsa di esseri viventi a quella degli uomini è trascorso circa un miliardo di anni. Non tutte le stelle possono vivere o sono vissute cosí a lungo: le piú luminose sono assai piú rapide a bruciare le loro risorse; d'altra parte, le meno luminose probabilmente non hanno pianeti o li hanno troppo freddi. Sono considerazioni come queste che portano alla stima di una stella ogni milione – forse un po' modesta. Resta a questo punto la possibilità che questa ipotetica civiltà extraterrestre piú vicina sia o ancora assai indietro o già assai progredita, rispetto alla nostra.

Dalla nostra esperienza sulla Terra, duecento anni in piú o in meno a partire, diciamo, dal 1900 d. C., fanno una differenza notevole. Quindi, se la civiltà piú vicina è meno progredita della nostra, di comunicare per ora non se ne parla: dovremmo recarci sul posto, e non ci sono veicoli, neppure allo stato ipotetico, che ci permettano un simile scambio di informazioni, a causa del fatto che la velocità della luce rimane un limite invalicabile anche teoricamente.

Occorre dunque che questi nostri vicini (a cento parsec) abbiano una civiltà piú progredita o almeno allo stesso livello della nostra. Non solo, ma una civiltà che non adotti alcun criterio per selezionare direzione e frequenza di emissione deve anche avere la volontà di spedire nello spazio circa 10^{25} erg/sec di energia radio perché ci sia possibile rilevarla. Per avere un'idea dell'energia

necessaria per ottenere questa emissione, basti pensare che noi probabilmente consumeremo nel 2000 circa 10^{19} erg/sec su tutta la Terra, e per tutti gli usi piú disparati. È concepibile un simile spreco di energia solo per la possibilità piú o meno peregrina di conoscere altre civiltà? Non volendo abbandonarsi a troppe audacie, si può allora affermare che questa civiltà ipotetica può però mantenere sotto osservazione con potentissimi strumenti un certo numero di pianeti e tra essi, forse, la Terra. In tal caso essi vedrebbero i nostri segnali radio e radar. Se si tiene presente che le nostre trasmissioni radio sono iniziate solo nel primo Novecento e che trenta parsec equivalgono a cento anni luce, ci si rende conto che non c'è da aspettarsi molto prima del 2500; ma da allora in poi ogni momento potrebbe essere buono. C'è da dire a questo proposito che nel novembre 1974, dal radiotelescopio di Arecibo, è stato inviato un segnale direzionale e a stretta banda che dovrebbe agevolare eventuali osservatori.

È anche da prendere in considerazione la possibilità che una civiltà sia piú vicina di cento parsec o che sia molto piú evoluta. Gli Ufo potrebbero essere testimonianze di questa ipotesi. L'atteggiamento generale nei confronti di questi oggetti è però di scetticismo, soprattutto perché appaiono confusi gli scopi di questi ipotetici e avanzatissimi visitatori: se infatti volessero essere visti e conosciuti, lo potrebbero fare assai meglio; e se volessero passare inosservati è certo che ci riuscirebbero, senza dare nell'occhio a passanti indiscreti. C'è da aggiungere che dai due piú vicini candidati (τ-Ceti e ν-Eridani, a circa dieci parsec) non si sono ricevuti segnali nonostante specifiche osservazioni da parte del National Radio Astronomy Observatory. Certo per ora non si pensa ancora a dedicare una gran quantità di tempo a questo tipo di ricerca e d'altra parte potremmo anche rimanere delusi dal ruolo e dagli scopi che eventuali piú avanzati interlocutori potrebbero assegnare al genere umano. [G. C. e A. M.].

L'astronomia è sempre stata intimamente legata agli sviluppi complessivi della **scienza**. L'**osservazione** astronomica, in origine legata alla speculazione astrologica (cfr. **astrologia**) ha utilizzato dapprima strumenti ottici (cfr. **luce, strumento**) e, con lo sviluppo della **tecnica** e della **fisica** moderne, ha potuto conseguire una strumentazione piú ampia che ha reso possibili gli esiti della astronomia radio, infrarossa, ultravioletta ed X (cfr. **particelle, propagazione, quanta**; per le difficoltà di ricezione nelle zone dell'infrarosso e dell'ultravioletto cfr. **atmosfera**). Dal primario e principale interesse per la **Terra** come centro dell'**universo**, attraverso i sistemi di Tolomeo, Keplero, la sintesi newtoniana e la teoria della relatività generale, si è pervenuti alla problematica attuale (cfr. **relatività, spazio/tempo** e, per le implicazioni filosofiche generali, **analisi/sintesi**). La Terra ed il **sistema solare** hanno perduto il loro ruolo privilegiato (almeno in questo settore della scienza) per dar luogo ad una visione dell'universo piú ampia e complessiva di quelle che storicamente l'hanno preceduta (cfr. **cosmologie**).

Cosmologie

1. *Cosmologia classica.*

1.1. Caratteri generali.

La curiosità per quello che noi sentiamo come esterno alla nostra coscienza deve essere antica come la nostra coscienza stessa. Cosí l'interesse a questi dati esterni, concepiti come un tutto unico, si manifesta, fin dagli albori della civiltà, come interesse per il problema cosmologico. La mente umana elabora le sue categorie e vi adatta la sua visione dell'universo; ma non tutte le civiltà primitive posseggono le stesse categorie, e non tutte si prefiggono lo stesso scopo nel costruire un modello dell'universo, per quanto i dati delle osservazioni siano a disposizione di ogni civiltà in ugual modo fino, diciamo, al 1600 d. C. Da ciò deriva la grande varietà dei modelli cosmologici antichi, che, quindi, trova la sua origine non nella diversità dei dati empirici, ma soprattutto nelle mutevoli forme del pensiero umano.

Grosso modo si può dire che le domande a cui le cosmologie primitive rispondono sono sostanzialmente di due tipi: la prima riguarda la struttura dell'universo e le leggi a cui obbedisce; la seconda richiede risposte su quale ne è stato il principio, e quale ne sarà la fine. In realtà la domanda non espressa è piú ampia: qual è il posto dell'uomo nel mondo? A questa domanda non espressa, forse per timore, corrisponde una risposta non formulata se non in modo oscuro. I cosmologi primitivi rispondono alle due domande espresse partendo dalla risposta non formulata che ritengono di conoscere, e che, bisogna dirlo, è sostanzialmente rassicurante. Una seconda osservazione è che l'interesse per il problema cosmologico non è probabilmente troppo profondo né troppo esteso perfino nelle civiltà piú sofisticate. È evidente che la grande maggioranza degli uomini si accontenta ancor oggi di una visione molto grossolana del mondo: le bastano spiegazioni banali e miti eziologici. Prova ne sia il convivere di diverse cosmologie in una stessa società. In una stessa cosmologia compaiono abitualmente relitti di modelli precedenti e anche nell'ambito di una stessa religione si ammettono diverse cosmologie purché venga lasciata inalterata la risposta fondamentale, riguardo al posto dell'uomo nell'universo.

Una caratteristica quasi esclusiva della cosmologia è che essa, come riassunto di risposte generali a problemi generali, non prevede sostanzialmente alcuna applicazione pratica. Il risultato è che soprattutto in cosmologia trovano applicazione le piú avanzate teorie, le ipotesi piú brillanti, o piú pazzesche. In realtà si vede assai per tempo che per modello cosmologico s'intende ciò che è remoto e non verificabile, piuttosto che ciò che è vicino e verificabile. Un matematico potrebbe dire che i modelli cosmologici antichi (e gran parte di quelli moderni) sono le condizioni al contorno, remote nel tempo e nello spazio, che determinano le condizioni presenti e vicine a noi: il cielo è sostenuto da pilastri, ma solo ad

Ercole è dato raggiungerli; nell'oceano nuotano i mostri; il punto di appoggio del mondo indú è costituito da tre elefanti che poggiano su una gigantesca tartaruga. Ancora una condizione al contorno è il modello atomistico, sebbene di genere piú sofisticato.

Non solo, spesso occorre costruire in queste cosmologie le condizioni al contorno anche per il mondo morale. Nell'universo si deve trovare posto anche per le abitazioni degli dèi, degli eroi, dei morti (beati e dannati), di tutte le entità spirituali che talune religioni si compiacciono di creare. Il risultato è che non di rado l'universo si «eticizza», cioè le varie entità spirituali e corporali ne popolano i vari livelli secondo una gerarchia prestabilita che in genere pone piú in «alto» i piú «perfetti».

Analizzare piú da vicino le cosmologie antiche pone di fronte a difficoltà notevoli. Se scarsa è la nostra conoscenza delle lingue morte, di gran lunga inferiore è quella che abbiamo delle metafore, col risultato che le immagini ci sfuggono. Non sappiamo bene chi fossero i cosmologi ufficiali, chi rappresentassero e a chi fossero indirizzate le loro speculazioni. Non sappiamo infine quali scambi culturali esistessero tra civiltà differenti e a quale livello. Ci colpiscono tuttavia alcuni elementi comuni: la vita è connessa di solito col caldo e con la luce, la morte invece col buio e col freddo. Tutto trae origine da un ristretto numero di elementi primevi. Sovente si tratta dell'acqua: le acque del primo capitolo della *Genesi*, l'acqua primordiale degli Egiziani, ecc. (qui certo si ispirò Talete, di cui è tradizionalmente riportato il tirocinio egiziano). Su queste acque compare il mondo, galleggiante nella sua forma iniziale, come uovo, o ninfea, o, addirittura, come collina primeva. Su questo scenario naturale compare eventualmente il demiurgo che pone ordine in un mondo preesistente. A suo tempo i Greci attingeranno ad entrambe le dottrine e le sistemeranno.

Molto comune è anche il concetto di acque sotterranee: identificate con la vita e quindi con la creazione – e questo è frequente in quelle civiltà che dipendevano soprattutto da pozzi e da sorgenti per il rifornimento d'acqua – oppure con la morte e il misterioso. È di quest'ultimo tipo il fiume sotterraneo dei morti degli Egiziani, l'Acheronte e tutta una collezione di fiumi infernali dei Greci. I Cinesi avevano le Fonti Gialle e ancora in epoca recente, prima che avvenissero i ben noti rivolgimenti, pare fosse difficile convincere i Cinesi a divenire minatori per il loro timore di trovare sottoterra la dimora dei morti.

Per quanto riguarda il concetto di razionalità dell'universo, questo riflette piú marcatamente situazioni sociali e storiche, che condizionano visioni sostanzialmente antropocentriche. Volta a volta troviamo una mente eterna dell'universo, un'anima razionale che assegna ad ogni parte una sua funzione ed un suo compito. Oppure, in tempi difficili, scopriamo una tensione inevitabile: gli Egiziani, ormai in piena decadenza, affermano che la giustizia (*Ma'at*) è l'equilibrio (precario) che tiene insieme il mondo, ma contro di essa operano forze oscure e disgregatrici, la cui efficacia può essere diminuita soltanto per mezzo della magia. L'ultimo passo spetta forse agli atomisti che vedono l'universo dominato dal Caso.

1.2. Cosmologie antiche.

Si esamineranno brevemente le antiche cosmologie dell'Egitto, della Mesopotamia, della Cina e dell'India, per rendere piú chiari i concetti appena esposti.

In Egitto si trova un chiaro esempio di un differenziato interesse per la cosmologia. Gli Egiziani vivono su un'isola piatta, bisecata, prevedibilmente, da un fiume. Il cielo è un baldacchino con quattro sostegni (pali? montagne? gli orli dell'altopiano in cui il Nilo si è scavato la sua via?) Il Sole è a volte l'occhio del cielo, a volte un falcone vittorioso, oppure un magico scarabeo che, a differenza dei suoi confratelli terrestri, rotola una palla di fuoco. La notte, il Sole la trascorre nelle dimore dei morti, percorrendo su una barca sacra il fiume infernale. Questo era il patrimonio comune dell'Egiziano, ma l'astronomia aveva fatto ben altri progressi: esistevano accurate mappe del cielo, e un calendario abbastanza evoluto; manuali astronomici e tavole del moto degli astri; e non è escluso che Ipparco vi si ispirasse per giungere al concetto di precessione degli equinozi (che si manifesta con uno spostamento dei poli sulla volta celeste).

D'altra parte esistevano scuole cosmologiche differenti, rivolte a circoli ristretti, in cui gli elementi mitici variavano a seconda del santuario da cui la scuola si irradiava, Eliopoli, Ermopoli, Eracleopoli, e cosí via.

In Mesopotamia si trova la stessa differenziazione e qualcosa in piú, nonostante che ci siano rimasti scarsissimi resti delle teorie cosmologiche. Il mondo mitico mesopotamico è a strati sovrapposti ed eticizzato. La Terra è lo strato mediano, ad ogni cosa è assegnata una funzione. I Sumeri addirittura frantumano la loro cosmologia a livello locale. La vita umana viene riconosciuta come dipendente da forze naturali imprevedibili e inarrestabili: tempeste, carestie, siccità. Invece di creare una cosmologia globale si identificano i sistemi di forze con gerarchie e genealogie di dèi. Ogni città ha il suo dio, la sua teologia, e, presumibilmente, la sua visione del mondo, non molto diversamente da quanto troviamo in Egitto, ma in modo assai piú generale. All'estremo opposto dello sviluppo della civiltà mesopotamica, durante l'impero persiano, troviamo le accurate osservazioni astronomiche, insuperate nell'antichità per la loro precisione, e la cosmologia dello zoroastrismo. Quest'ultima ha radici decisamente religiose: l'universo è lo sfondo per la grande battaglia fra il bene e il male, Ahura Mazdā e Angra Mainyu. È quindi un episodio unico e irripetibile. Ci sono quattro epoche con prologo ed epilogo. La durata delle quattro epoche è di 12 000 anni in cui i due principî popolano i Cieli e la Terra di loro produzioni, rispettivamente buone e cattive. La battaglia finale, dopo un progressivo peggiorare del mondo, verrà vinta dal Bene. La battaglia di Qadesh, divenuta cosí leggendaria che ne conosciamo i dettagli ma non la data precisa, segnò la sconfitta di un esercito, la fine di una dinastia, la disfatta di una civiltà, e l'annientamento di una religione, fatti tutti cosí completi da farci dubitare che ci sarà mai una rivincita per Ahura Mazdā.

Anche in Cina le scuole di pensiero cosmologico sono diverse. Intorno al 180 d. C. se ne riconoscono tre principali, a seconda del modello di universo:

quello a doppia cupola, quello a sfere concentriche, quello infine del vuoto infinito. Nel primo caso le distanze sono ben definite, e la geometria è semplice. Ci sono 80 000 li (miglia cinesi) fra terra e cielo. Il raggio del disco terrestre è 150 000 li. La durata è 129 000 anni. Nel modello a sfere concentriche l'universo è un uovo, di cui la Terra è il tuorlo. Per il resto c'è una notevole somiglianza col sistema eliocentrico medievale. Infine, nel terzo modello cosmologico, l'universo è uno spazio vuoto infinito in cui eternamente vagano corpi che non sono attaccati a nulla. In quanto alla costituzione dell'universo, i cinque elementi (metallo, legno, fuoco, terra e acqua) sono originati da due principî attivi (presumibilmente introdotti in un secondo tempo), i ben noti *yin* e *yang*.

Se si esaminano i tre esempi considerati si vede che, per quanto concerne le dimensioni dello spazio e del tempo, l'atteggiamento dei vari cosmologi primitivi è piuttosto vario. Tuttavia si può trovare una guida nell'attitudine di una civiltà a maneggiare numeri. Delle scienze speculative l'aritmetica è forse la prima ad affacciarsi in cosmologia. I modi con cui il numero può entrare a far parte dell'universo sono essenzialmente due: nel primo il numero appare come misura dell'universo; nel secondo il numero assume una mistica propria. La mistica del numero assume a sua volta forme diverse: dai pitagorici che ad ogni numero assegnano una fisionomia propria, e ne fanno il principio grazie al quale ciò che è indeterminato giunge a determinarsi, ai moderni cosmologi che ancora sono affascinati dalle cosiddette coincidenze numeriche. Il passo non è poi tanto lungo, dalla coincidenza fra il numero dei pianeti, e dei giorni della settimana, e poi di tutti i sette che si ritrovano nelle Scritture, fino a giungere alle coincidenze fra l'età dell'universo misurata in «unità fondamentali di tempo» e la radice quadrata del numero dei nucleoni presenti nell'universo. Presentata cosí all'improvviso, quest'ultima coincidenza (alla base delle speculazioni di Eddington, di Dirac e di Jordan) può apparire molto piú peregrina, e certo meno affascinante delle altre citate prima. Ma per tornare all'altro aspetto del numero, quello di fornire una misura, nello spazio e nel tempo, all'universo in cui viviamo, notiamo che le cosmologie dei popoli che non hanno dimestichezza coi grandi numeri, o, addirittura, non possiedono né parole né simboli per indicarli, possono solo scegliere fra dimensioni relativamente piccole, oppure dimensioni infinite. Questo non è però un problema per gli indú. In una loro raccolta di problemi e indovinelli compare uno dei numeri piú grossi dell'antichità, 2^{153} (in notazione decimale, avrebbe una quarantina di cifre). Non c'è da stupirsi allora a scoprire che l'universo indú si articola in lunghissime epoche e gigantesche dimensioni. Le quattro età del mondo (*mahāyuga*), di durata sempre piú breve, durano 12 000 anni del mondo. L'età in cui viviamo ne durerà 1200, ed è iniziata il 17 febbraio 3102 a. C. (Non si pensi che questa «precisione» sia esclusiva degli indú o dei popoli primitivi. Nel 1658 l'arcivescovo Usher si diceva convinto che la creazione fosse avvenuta esattamente il 23 ottobre 4004 a. C., di domenica, per l'appunto). Questa inconsistenza, che è evidentemente dovuta al sovrapporsi di diverse credenze, richiede un piccolo aggiustamento. La cosa è semplice: esistono anni degli uomini, anni del mondo e anni di Brahmā. Ogni anno degli uomini è un giorno del mondo. Un *mahāyuga* dura cosí 4 320 000 anni degli uomini. Ma mille

interi *mahāyuga* non sono che un giorno di Brahmā. Una notte dura altrettanto. Un giorno ed una notte di Brahmā (*kalpa*) costituiscono un intero ciclo per l'universo, dalla creazione alla distruzione. La vita di Brahmā, che adesso avrebbe circa cinquant'anni, è di 100 anni (*para*). (Anche qui vediamo insinuarsi il sogno antropocentrico). Al termine della vita di Brahmā, giunge la fine. Già ora possiamo dire che la fantasia degli indú superò gran parte delle cosmologie moderne, che durerebbero, al massimo, sí e no un *kalpa*.

Quanto alle dimensioni spaziali, gli indú non sono meno generosi: noi viviamo a sud del mitico monte Meru, in un disco di continenti e oceani concentrici. Il monte Meru è rotondo, ed è fatto di metalli e pietre preziosi. È alto 84 000 yojana, e «profondo» 84 000 yojana (un yojana, o giorno di marcia, è circa 15 chilometri). L'uovo cosmico, però, è 500 milioni di yojana; il numero di uova cosmiche nell'universo è incerto. Qui però vediamo che gli indú non sono riusciti neanche lontanamente ad avvicinarsi alle dimensioni dell'universo come noi lo concepiamo: occorrerebbero non meno di diecimila diametri di uova cosmiche per arrivare alla stella piú vicina. I jaina sono ancora piú audaci: in quanto al tempo, l'universo è eterno, sebbene articolato in cicli di dodici epoche. Quanto allo spazio, l'universo, che è finito ed ha la forma di un differenziato gigante cosmico, è misurato in unità rajju: un dio percorre tale spazio in sei mesi alla velocità di 2 097 152 yojana in un «batter d'occhio». Possiamo quantificare questa misura in circa 600 milioni di chilometri al secondo. Il rajju è dunque circa 300 anni luce. Come unità di misura non c'è male.

Con quanto precede si è data soltanto un'idea vaga di ciò che l'antichità intendeva per cosmologia. Questi stessi caratteri si possono ritrovare nelle cosmologie dei popoli primitivi odierni. Non devono però mancare tarde interpolazioni. Infatti non tutto è chiaro nelle tradizioni cosmologiche moderne di questi popoli. Per citare un caso che recentemente ha suscitato interesse, i Dogon, una tribú dell'Africa occidentale, sono in possesso di strabilianti cognizioni astronomiche. La loro tradizione, a quanto pare, li informa del fatto che Giove ha quattro satelliti, e che Sirio ha un compagno. Queste informazioni, con qualche riserva per quanto riguarda la prima, non sono ottenibili ad occhio nudo. Sacerdoti Dogon rivelarono ad antropologi francesi intorno al 1940 che l'oggetto della loro venerazione è la stella Po, invisibile (a occhio nudo) compagna di Sirio, ma molto piccola e densa, e con un periodo di rivoluzione intorno a Sirio di cinquant'anni. Questi dati corrispondono a realtà: la compagna di Sirio, nota col nome di Sirio B, è una nana bianca, cioè una stella di dimensioni paragonabili a quelle terrestri, ma di densità un milione di volte superiore, ed effettivamente il suo periodo di rivoluzione è di cinquant'anni. È difficile spiegare questi dati dei Dogon, ed altri ancora. L'interesse per Sirio, presente in molte civiltà antiche, è probabilmente dovuto al fatto che si tratta della stella piú brillante del cielo settentrionale. Ma, per spiegare il resto, si è fatto ricorso alla visita degli immancabili viaggiatori extraterrestri, desiderosi di riferire ai loro primitivi interlocutori notizie quasi unicamente astronomiche (tra l'altro inesatte, perché Giove non ha quattro ma almeno quattordici satelliti). I Dogon rivelano anche l'esistenza di una terza stella, associata a Sirio, quattro volte piú grande di Sirio B, con un

periodo di rivoluzione di trentadue anni, e fornita di un pianeta. Di questa stella non c'è traccia nelle osservazioni astronomiche odierne. Il pianeta è essenziale perché è di là che vengono gli informatori dei Dogon. Forse la spiegazione è piú modesta, e si tratta soltanto di recenti rielaborazioni di teorie astronomiche moderne giunte chissà come a questa tribú. Potrebbe esserne una prova il fatto che effettivamente fra il 1920 e il 1930 ci fu l'annunzio di questa terza stella vicino a Sirio.

1.3. Cosmologia occidentale fino al 1600.

La cosmologia ufficiale moderna porta poche tracce dei fermenti che si sono indicati. C'è qualche residuo, e qualche coincidenza, che fa pensare al riemergere di correnti di pensiero piuttosto che ad una reale eredità. La cosmologia attuale può essere fatta risalire in blocco ai Greci, anche se in veste di eredi di un piú vasto patrimonio culturale.

Dei primi cosmologi si hanno solo dei frammenti. Ma in qualche modo con Anassimandro è già accettato il concetto, che resterà immutato, di una Terra che non galleggia affatto sulle acque, ma è sospesa in equilibrio senza alcun appoggio esterno. Quanto agli elementi primevi, questi oscillano da un dato concreto (l'acqua di Talete o l'aria di Anassimene; ma non si sa quanto speciali fossero quest'acqua e quest'aria) a un concetto filosofico, l'ἄπειρον, concetto poco chiaro, e traducibile come 'illimitato' o, meglio, 'indeterminato'.

È in Platone che si trova la prima affermazione esplicita che l'universo deve essere comprensibile razionalmente. Questo è, in fondo, l'assioma su cui si basano gran parte di queste pagine. Da esso discende il corollario che all'universo devono essere applicabili la logica classica, la matematica, la fisica di laboratorio. A voler essere severi, questo programma non è stato rispettato che a posteriori. La geometria euclidea è insufficiente a descrivere l'universo ed è occorsa la rivoluzione compiuta dalle geometrie non euclidee, prodotto ottocentesco, per preparare la veste geometrica appropriata a questa descrizione. La fisica poi ha dovuto subire due rivoluzioni, operate rispettivamente dalla relatività e dalla meccanica quantistica; la prima, soprattutto, essenziale nel pensiero cosmologico moderno.

Quanto alla logica classica, potrebbe essere necessaria una nuova logica, la logica quantistica, per spiegare fenomeni di classe diversa, che (ammesso che esistano, come i fenomeni extrasensoriali) non possono essere inquadrati nelle nostre scienze attuali.

Questi problemi sono vivi al giorno d'oggi; respinti alla periferia del pensiero scientifico ufficiale, di tanto in tanto riaffiorano prepotentemente. Le proposte sono talmente affascinanti da essere quasi espressioni vuote. Il loro linguaggio sfiora la mistica, l'evidenza sperimentale è praticamente nulla, e quel poco che c'è probabilmente è falsato da puerili raggiri. Ciò non toglie che ci sia qualcosa di vitale alla base di queste speculazioni. Se non le risposte, almeno le domande fanno parte della cosmologia; il lettore dovrebbe forse essere preparato a rivolgimenti completi di pensiero.

Col passare dei secoli, dopo la sintesi tolemaica, non si riesce ad ottenere nuove osservazioni. Si può dire che fino al Settecento l'universo consista quasi unicamente nel sistema solare con l'appendice della sfera delle stelle fisse. Ma già in precedenza compaiono alcune questioni notevoli; si inizia a discutere sul tempo e sullo spazio. Intorno al 1000, Avicenna afferma che il tempo è la misura del moto; sull'enciclopedia *Rasā'il* troviamo che lo spazio è una forma astratta dalla materia, ed esistente solo nella coscienza. Ci sono controversie interessanti: il nostro universo è l'unico possibile? È l'unico esistente? E poi, esistono altri mondi abitati? Per quanto l'evento drammatico in questa serie di questioni sia il rogo di Giordano Bruno del 1600, curioso anche se forzato contrappunto al processo di Galileo, già nel 1277 si era dichiarato alla Sorbona che non può essere negato a Dio il potere di creare quanti e quali universi a lui sembri opportuno. Ma finalmente viene scoperto il cannocchiale, e nuovi dati cominciano ad affluire. Già Galileo, nel 1610, puntando il suo telescopio sulla Via Lattea, la interpreta come uno sterminato sciame di stelle lontane. Sono, questi, esempi degli altri mondi possibili? Ecco che i confini dell'universo incominciano ad allargarsi, anche se bisognerà attendere ancora trecento anni per prendere in considerazione un universo che si estenda oltre i confini della nostra galassia.

2. *Progressi nelle osservazioni.*

L'esplosione di ricerche astronomiche, e piú particolarmente cosmologiche, degli ultimi cento anni, rende assai difficile organizzare i vari dati. Un ordine cronologico porterebbe solo ad una gran confusione. Riteniamo opportuno quindi seguire una via intermedia, elencando in ordine cronologico le scoperte suddivise secondo i principali problemi.

2.1. L'esplorazione dell'universo.

Con la scoperta di Galileo, dunque, i confini dell'universo si espandono, ed un nuovo oggetto, la Via Lattea, sostituisce la sfera delle stelle fisse. Il problema è se questo nuovo oggetto costituisca o no l'intero universo. Tuttavia esso non assume importanza primaria per circa trecento anni a partire dalla scoperta annunziata da Galileo: l'attenzione è invece concentrata sulla meccanica celeste, che investiga il moto di pianeti, asteroidi e comete, lasciandolo praticamente senza misteri. Intanto Herschel e Messier, quest'ultimo quasi controvoglia, rivolgono la loro attenzione verso oggetti che non appaiono puntiformi (e quindi non sono confondibili con stelle) e non sono né pianeti né comete. Sono le «nebulose». L'ipotesi cosmogonica di Kant e Laplace suggerisce subito che queste nebulosità, che sovente appaiono avvolgere stelle particolarmente brillanti, siano appunto le regioni in cui si formano le stelle. Laplace stesso però lascia aperta la possibilità che si tratti di «universi-isola» del genere della Via Lattea. Alla fine del secolo scorso la prima ipotesi sembra prevalere. Il nostro secolo, chiarito una volta per tutte che le nebulose possono essere distinte in almeno tre classi di

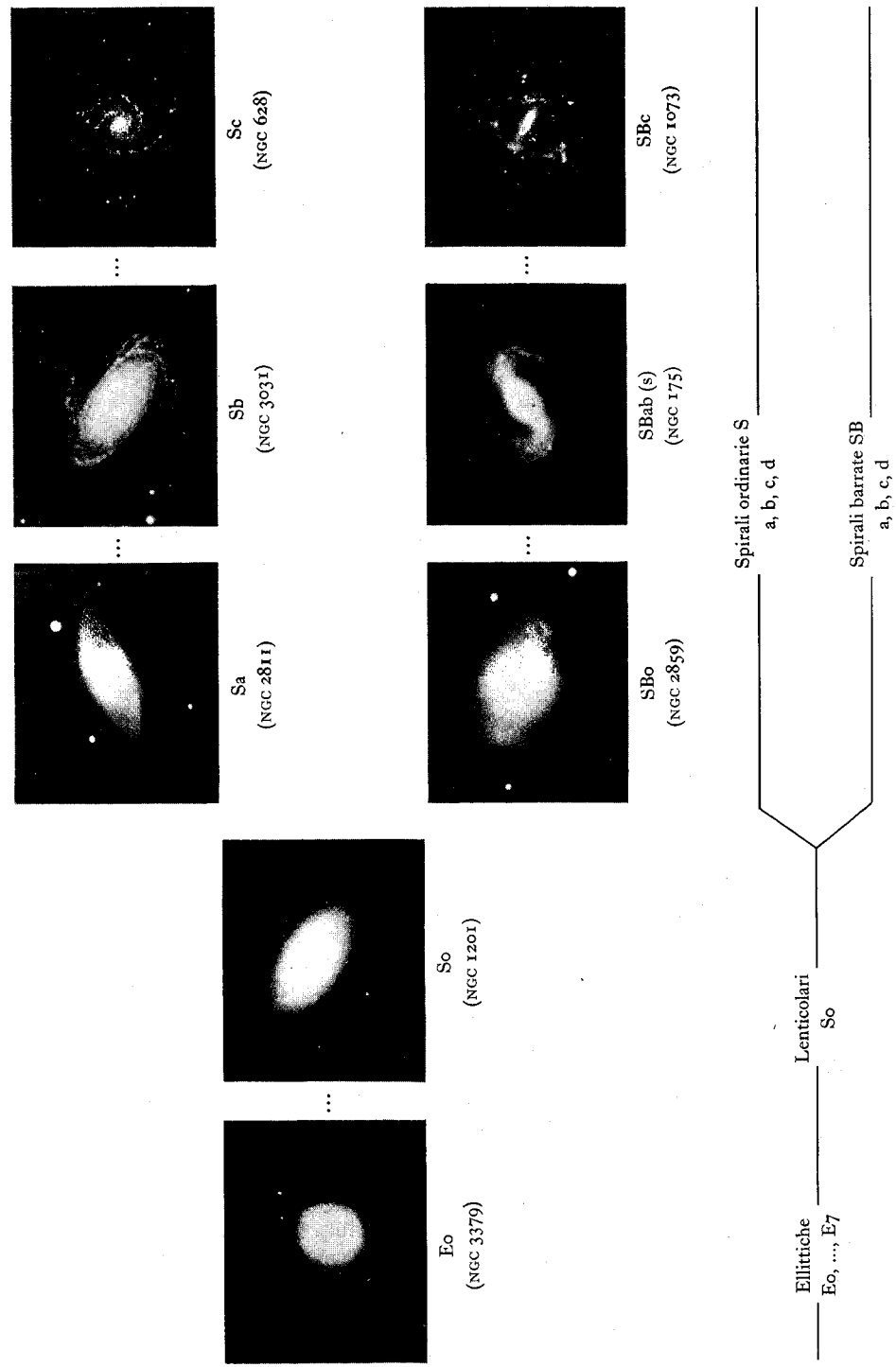


Figura 1.
In basso, schema della classificazione delle galassie. In alto, alcuni rappresentanti delle varie classi. Fra parentesi il numero con cui vengono elencati nel Nuovo Catalogo Generale.

oggetti sostanzialmente differenti, vede il trionfo della seconda ipotesi: la maggior parte delle nebulose sono universi-isola, paragonabili alla Via Lattea per struttura e dimensioni.

La difficoltà essenziale è che, pur accumulandosi l'evidenza contro l'appartenenza alla Via Lattea della maggior parte di questi oggetti, le distanze ad essi attribuite assegnano loro dimensioni assai diverse da quelle attribuite alla Galassia (seguendo una convenzione corrente, si indica con Galassia la nostra galassia o Via Lattea). Questi due problemi – dimensioni della Galassia e distanze delle nebulose extragalattiche – sono gli argomenti del leggendario, ed ora quasi dimenticato, «grande dibattito» fra Shapley e Curtis (avvenuto a Washington il 26 aprile 1920). Verità ed errore sono quasi ugualmente distribuiti: Shapley sbaglia sulla natura delle nebulose extragalattiche, ma assegna dimensioni quasi corrette alla Galassia; Curtis sbaglia sulle dimensioni della Galassia, ma ha ragione nella sua ipotesi degli universi - isola. Il dibattito, poi, non risolve nulla per il momento, limitandosi a mettere a fuoco i problemi. Finalmente, nel 1924 la questione viene risolta: la scoperta delle cefeidi della nebulosa di Andromeda, che illustreremo piú avanti, permette una valutazione ragionevolmente accurata della sua distanza, circa due milioni di anni luce dalla Terra (è un grande progresso: ancora nel 1907 la distanza ufficiale era di diciannove anni luce; nel 1911 di milleseicento).

Negli anni successivi i confini dell'universo vengono allontanati ad una vertiginosa velocità. Il problema della struttura dell'universo e della natura dei corpi che lo popolano si confonde in modo inestricabile con quello della determinazione delle distanze. Non volendo quindi seguire un ordine cronologico, vorremmo presentare la visione attuale sulle varie classi di oggetti che popolano l'universo, limitandoci, necessariamente, ai piú importanti.

L'universo è sostanzialmente vuoto: la materia luminosa ed oscura è diluita, o è concentrata in aggregazioni minute rispetto alle distanze che le separano. Inoltre sono presenti anche radiazioni di praticamente tutte le lunghezze d'onda, e rare particelle di alta energia, i raggi cosmici. Della materia oscura si sa poco: il gas intergalattico dovrebbe manifestarsi assorbendo la radiazione da sorgenti lontane, ma né misure radio né misure ottiche hanno dato risultati definitivi. In quanto alla materia luminosa, essa è concentrata in estese e rarefatte unità, gli ammassi di galassie. Se queste siano a loro volta parte di unità di ordine superiore, è tuttora un problema aperto. Un ammasso medio ha dimensioni di qualche milione di anni luce, e contiene qualche centinaio di galassie paragonabili alla nostra, oltre ad innumerevoli altre piú piccole, ed a qualcuna piú grande.

Le unità che compongono un ammasso, le galassie, non sono quindi dello stesso tipo. La classificazione piú nota risale a Hubble (1936) ed assume la caratteristica forma del «diagramma a diapason», che, almeno inizialmente, l'autore sperava di poter interpretare in senso evolutivo. Alla sinistra della figura 1 vediamo le galassie ellittiche E0, E1, ..., E7. Il numero che accompagna la lettera E indica l'ellitticità dell'oggetto, cioè quanto l'oggetto si presenta schiacciato, secondo una convenzione piú o meno naturale. Le E0 sono galassie sferiche, le E7 hanno uno spessore che è circa un terzo del diametro. Poi il diagramma si bi-

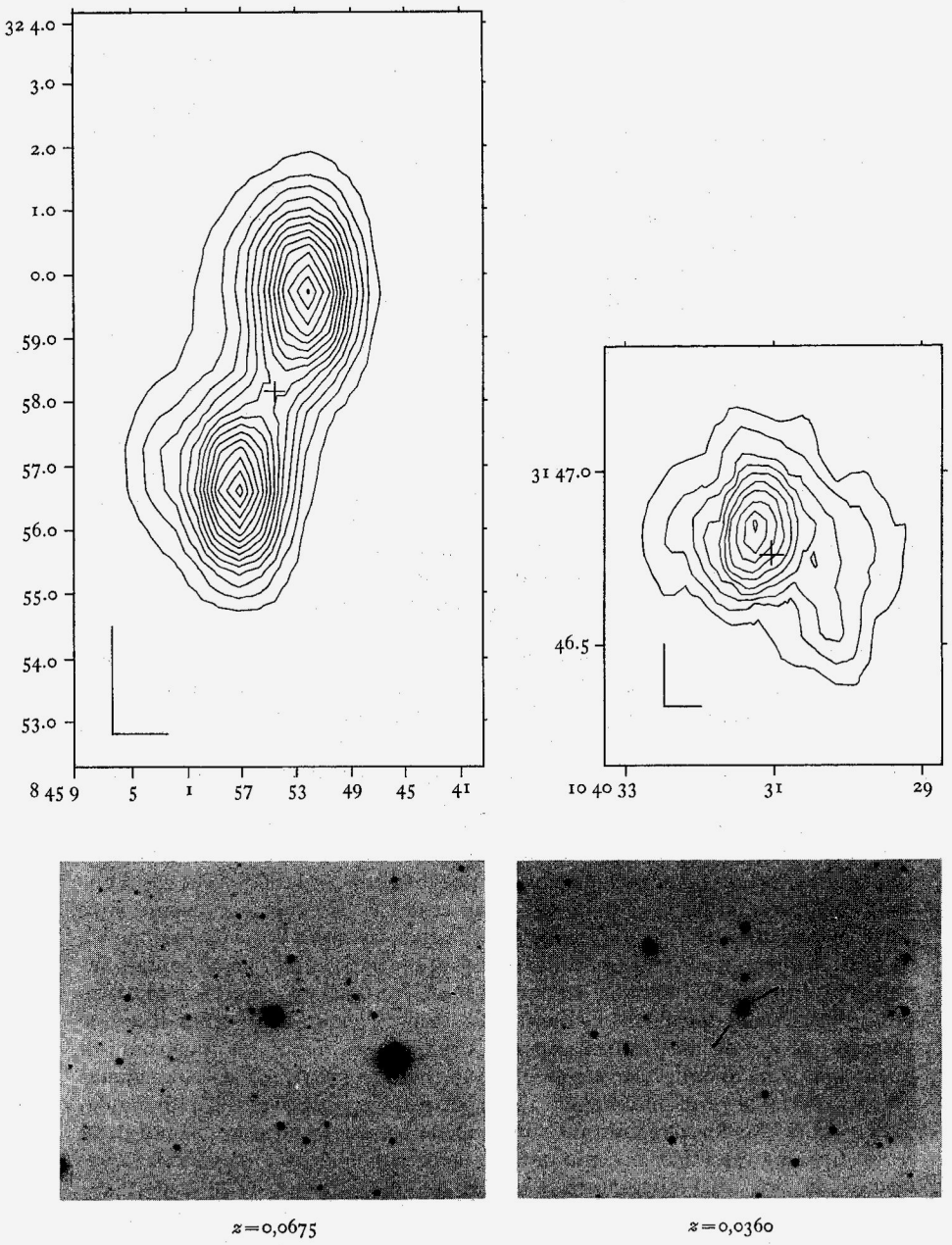


Figura 2.

In alto, le mappe radio di due sorgenti a due frequenze diverse, 610 MHz e 4995 MHz (milioni di hertz). Si noti la struttura doppia di quella a sinistra. Le crocette nelle mappe radio individuano la posizione dell'oggetto ottico associato. In basso, le galassie, visibili nell'ottico, identificate con le due radiosorgenti. Le mappe radio sono state ottenute col radiotelescopio di Westerbork. Le foto sono riproduzioni di lastre ottenute a Monte Palomar.

forca: nel ramo superiore compaiono le galassie spirali (S), che appunto presentano due o piú bracci spirali. Le Sa hanno un grande nucleo, e bracci spirali strettamente avvolti, mentre all'estremo opposto, le Sc presentano un nucleo piccolo e bracci spirali aperti. Nel ramo inferiore compaiono le galassie SB, spirali barrate, in cui i bracci spirali si dipartono dagli estremi di una «barra» passante per il nucleo della galassia. Non è chiaro perché le galassie si differenzino in queste tre grandi categorie, né perché si formino i bracci spirali. L'approccio a questo problema può essere analitico, oppure può richiedere l'uso di grandi elaboratori elettronici. Le simulazioni di galassie che si ottengono con quest'ultima tecnica sono assai notevoli da un punto di vista spettacolare, ma non hanno ancora dato luogo a modelli accettati da tutti.

Tra le varie galassie spirali conosciamo soprattutto la nostra, sebbene non ne possiamo avere una vista dall'esterno. Gli studi soprattutto di Oort, iniziati intorno al 1920, hanno fornito una notevole conoscenza della sua struttura e della sua dinamica. La Galassia è un disco non omogeneo, di centomila anni luce di diametro, e di spessore variabile, e comunque di poche migliaia di anni luce. Questo disco contiene circa cento miliardi di stelle di luminosità paragonabile a quella solare, e ruota in modo non uniforme intorno al suo asse: il Sole impiegherebbe circa cento milioni di anni a compiere la sua rivoluzione intorno al centro della Galassia. Statistiche stellari, e l'indagine per mezzo della linea a 21 centimetri dell'atomo di idrogeno, permettono di rilevare la presenza di addensamenti relativamente regolari di gas e di stelle nel disco: di qui si deduce che la nostra è una galassia spirale, non dissimile nell'aspetto dalle altre galassie spirali esterne. Ammassi di galassie e galassie sono gli oggetti piú comuni dell'universo.

Degli oggetti meno comuni, i quasar sono forse i piú notevoli, e vi accenneremo piú oltre, trattando della misura delle distanze cosmiche. Non meno interessanti sono le radiosorgenti extragalattiche, le quali emettono la loro energia soprattutto nella banda radio, anziché nella banda ottica. In gran parte, queste sorgenti sono in qualche modo associate con oggetti osservabili otticamente, ed in realtà solo in questo caso si può tentare, con qualche speranza di successo, una valutazione della loro distanza, valutazione essenziale anche perché nella Galassia esistono molte sorgenti radio con le piú svariate caratteristiche. Le piú notevoli fra le sorgenti radio extragalattiche sono oggetti enormi, che possono raggiungere dimensioni di milioni di anni luce, e presentano una struttura multipla, doppia nella maggior parte dei casi, consistente cioè in due «lobi» posti a qualche distanza da una galassia osservabile otticamente e da bande opposte. In alcuni casi si hanno diverse coppie di lobi allineate, che paiono suggerire che coppie di nuvole di campo magnetico e particelle relativistiche sono state successivamente espulse dalla galassia centrale in direzioni opposte. Per quanto suggestiva, questa teoria spiega assai poco delle radiosorgenti doppie, e si può affermare che la loro natura è sostanzialmente ignota (cfr. fig. 2).

L'ultimo «oggetto» che si prende in considerazione non è un oggetto localizzato, è la «radiazione di fondo». Predetta, come si vedrà, dai fautori dei modelli cosmologici che richiedono una esplosione iniziale (*big bang*), ricercata da Dicke a partire dal 1964, scoperta finalmente (inattesa e indesiderata) da Penzias e

Wilson nel 1965, la radiazione di fondo ha assunto il ruolo di protagonista nelle speculazioni cosmologiche: ad esempio, il modello dell'universo stazionario è rifiutato soprattutto perché non è in grado di spiegarne l'esistenza. Come si manifesta? Si consideri l'osservazione di sorgenti radio: esse si presentano come un segnale che emerge da un «rumore di fondo». Quest'ultimo può essere originato dalle cause piú svariate: si può trattare di scariche atmosferiche, o artificiali, quali stazioni radio, motori, ecc. Ci sono anche componenti stazionarie, dovute alla nostra atmosfera, ed alla Galassia (come si può dedurre dal fatto che quest'ultima componente aumenta quando il radiotelescopio punta in direzione del piano galattico). Se si va verso minori lunghezze d'onda (centimetriche) emerge una nuova componente, via via piú intensa, ed isotropa (che cioè ha la stessa intensità in tutte le direzioni della sfera celeste). La seconda caratteristica notevole è che essa ha una distribuzione dell'intensità in funzione della lunghezza d'onda (spettro) caratteristica di un «corpo nero» scaldato alla temperatura di circa 3 gradi Kelvin, cioè di 3 gradi centigradi al di sopra dello zero assoluto (cfr. fig. 3).

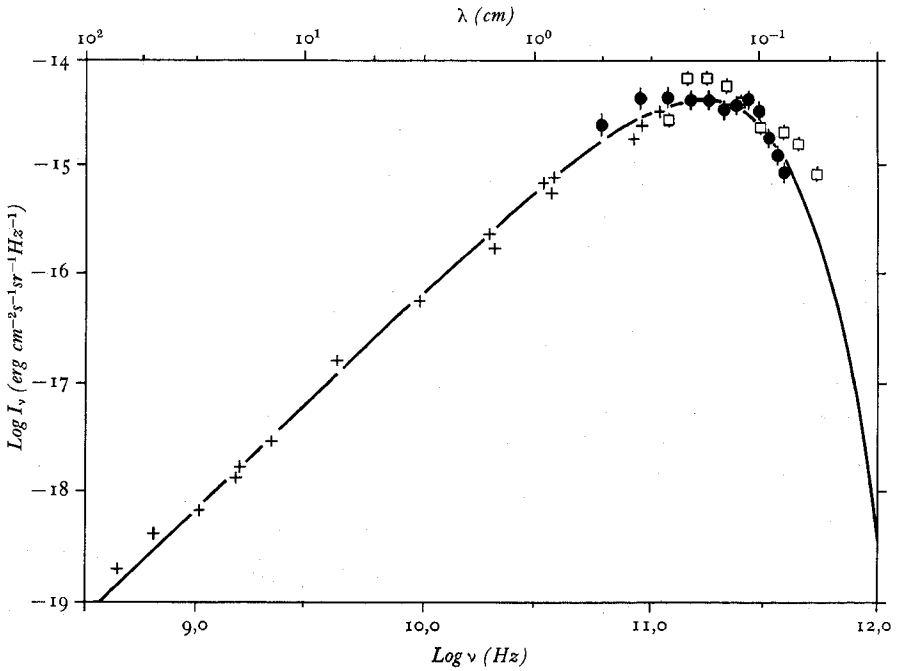


Figura 3.

Distribuzione in funzione della frequenza dell'intensità della radiazione di fondo. La curva è ottenuta teoricamente per un corpo nero a temperatura $T = 2{,}7$ °K. I punti neri, le crocette e i quadratini rappresentano i valori sperimentali dell'intensità della radiazione di fondo ottenuti in recenti esperienze.

A questo punto si può ritenere conclusa la breve panoramica sui principali «personaggi» che popolano l'universo, e di cui bisogna tener conto in un qualsiasi tentativo di formulare un modello cosmologico. Ma per poter assegnare una struttura all'universo occorre conoscere anche le distanze dei vari oggetti, la loro età e la loro composizione. Analizziamo ora questi tre problemi.

2.2. La misura dell'universo.

I primi metodi che permettono di assegnare dimensioni all'universo prevedono sostanzialmente applicazioni della trigonometria. Con tali mezzi i Greci eseguirono le prime misure della circonferenza terrestre, della distanza Terra-Luna e Terra-Sole. Sebbene i risultati possano essere inesatti (anche di un fattore 20 nell'ultimo caso) importa che il metodo sia essenzialmente corretto. Ruggero Bacone invece riporta il diametro della sfera delle stelle fisse in 130 milioni di miglia romane: il concetto è ora inesistente, il metodo è ignoto. Ma quando si vuole misurare la distanza delle stelle con metodi trigonometrici, strumenti ben piú precisi sono essenziali. È noto il metodo della parallasse: una stella vicina sembrerà percorrere sullo sfondo delle stelle piú lontane una ellisse, ellisse apparente che non è altro che la proiezione dell'orbita terrestre. Se la metà dell'angolo sotteso dal diametro maggiore di questa ellisse è un angolo φ (ed è questo che viene definito parallasse), da una elementare formula di trigonometria si trova la distanza d della stella, una volta noto il valor medio del raggio A dell'orbita terrestre: $d = A/\varphi$, con φ misurato in radianti. Non ci sono stelle la cui parallasse sia superiore ad 1 secondo d'arco. Incidentalmente, una parallasse di 1 secondo d'arco corrisponde alla distanza della stella di 3,26 anni luce (1 parsec), e costituisce una unità di misura di distanza largamente usata in astronomia. Il lettore potrà quindi subito dedurre la distanza di una stella misurata in parsec quando gliene sarà stata detta la parallasse: se la parallasse è 0,03 secondi d'arco, la distanza è 1/0,03 parsec, circa 30 parsec, cioè circa 100 anni luce. Si vede dunque che l'uso di questo metodo richiede delicatissimi strumenti e la scelta, a priori casuale, di stelle idonee. Non stupisce quindi il fatto che le prime misure positive siano state rese pubbliche nel 1838 su α-Centauri (da Henderson), su 61-Cygni (da Bessel), e su Vega (da Struve). I moderni telescopi possono in linea di principio risolvere tutt'al piú spostamenti di centesimi di secondo, e quindi è da escludere questo metodo per le stelle distanti piú di 100 parsec. Le stelle a cui questo metodo si applica sono quindi un'infima minoranza. Inoltre l'esistenza di moti propri delle stelle può complicare la valutazione della parallasse. In realtà il moto stesso di un oggetto stellare può fornire una valutazione della distanza, sebbene alquanto incerta. Il moto di una stella può permetterci di stabilire che essa fa parte di un certo gruppo di cui in qualche modo si conosce la distanza. Con ciò la distanza della stella in questione resta automaticamente determinata. Quanto alla distanza di un certo gruppo stellare, essa può essere determinata o perché si conosce in qualche modo la distanza di un suo elemento, o sulla base di certe ipotesi sui moti globali nella Galassia, o in altri modi ancora che vedremo piú oltre.

Mentre il metodo delle parallassi otteneva i suoi piú prestigiosi (e pressoché unici) successi, erano in cantiere altri metodi piú efficaci. Ricerche spettroscopiche di laboratorio e tentativi di classificazione stellare permettevano la costruzione del diagramma di Hertzsprung-Russell. Dal tipo spettrale della stella si risale alla temperatura. Da questa, nell'ipotesi (quasi realizzata) che la stella irraggi come un corpo nero, alla luminosità assoluta L. Ma il flusso F ricevuto da un oggetto puntiforme e misurabile per mezzo di fotometri, è legato alla luminosità assoluta dalla relazione $L=4\pi d^2F$, dove d è la distanza, che quindi può essere ottenuta una volta noti L ed F. Questo metodo fornisce ragionevoli valutazioni delle distanze per stelle anche lontanissime. Occorrono altri metodi piú potenti quando le stelle diventino troppo deboli per ottenere uno spettro, o si vogliano delle stime un poco piú precise di quelle ottenibili per mezzo del diagramma di Hertzsprung-Russell. In quest'ultimo è presente infatti una certa «dispersione»: stelle appartenenti alla sequenza principale e con la stessa temperatura possono avere luminosità differenti anche di un fattore 10, e quindi le distanze possono variare di un fattore 3 circa.

Uno di questi metodi era decisamente imprevedibile: ci si riferisce qui alla scoperta di una relazione «ben definita» (determinazione che fu poi corretta da Baade in seconda approssimazione) tra il periodo della variazione di luce (mi-

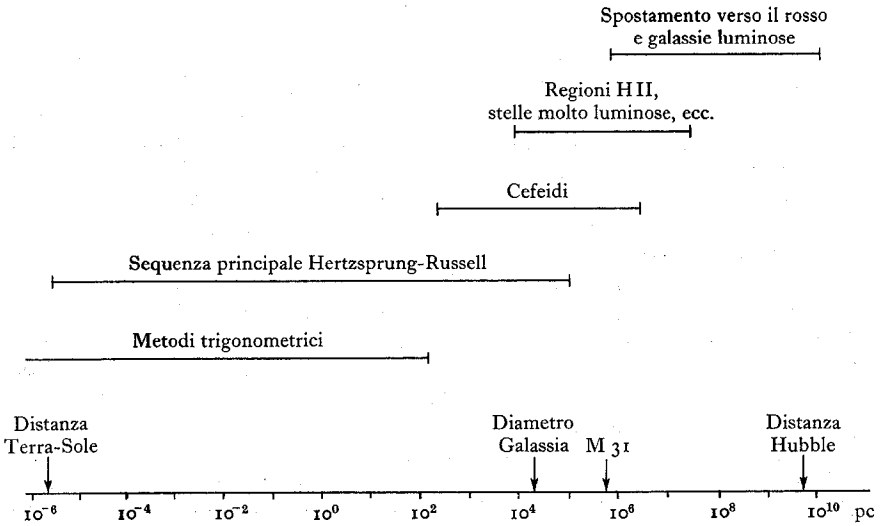


Figura 4.

Distanze raggiungibili con i vari metodi esposti nel testo. Sono anche riportate le distanze Terra-Sole, il diametro della nostra galassia, la distanza dalla Terra della nebulosa di Andromeda (M 31) che appartiene al cosiddetto Gruppo locale, costituito dalle galassie legate gravitazionalmente con la nostra, e infine la stima del raggio dell'universo ottenuta tramite la relazione di Hubble.

surabile dalla Terra senza difficoltà) e la luminosità assoluta di certe stelle variabili periodiche caratteristiche, che vengono dette cefeidi (queste stelle, di solito giganti o supergiganti, devono il loro nome alla stella δ-Cephei, la prima ad essere scoperta e visibile ad occhio nudo). La scoperta, dovuta all'astronoma americana Henrietta Leavitt (1912), è un esempio di un ragionamento tipico. La relazione appare evidente se si considerano le stelle che fanno parte di un gruppo posto ad una distanza ben definita, in questo caso le Nubi di Magellano, due galassie nane poste a circa 50 chiloparsec (150 000 anni luce) dalla nostra galassia. Una volta stabilita la relazione, si tratta di tararla, individuando, per esempio, una cefeide in un gruppo di cui si conosca in altro modo la distanza. Questo è normalmente il momento piú delicato del processo. È evidente l'importanza di queste stelle: appena se ne scopre una in un sistema stellare anche lontanissimo, se ne osserva il periodo e automaticamente ne diventa nota la distanza: cosí fu determinata con una certa precisione la distanza della nebulosa di Andromeda, in seguito alla scoperta di cefeidi nel 1924, come del resto si è già accennato. In questo modo si esce dalla Galassia, e si è in grado di definire le distanze delle galassie piú vicine. Vi sono tuttavia galassie ed ammassi di galassie cosí lontani che non possono esserne distinte o «risolte» le stelle singole. Vi sono anche altri oggetti compatti che non sono stelle, ma che evidentemente devono trovarsi assai distanti. Per procedere a definire le distanze anche di questi sistemi stellari si ricercano oggetti particolari che abbiano una luminosità abbastanza ben definita (cfr. fig. 4).

Un primo tentativo fu fatto in termini di stelle supernovae. Nelle grandi galassie compaiono con frequenza, grosso modo di una ogni cento anni, stelle che esplodono diventando, per un breve periodo di tempo, luminose quanto l'intera galassia che le ospita. Queste stelle, le supernovae, hanno una luminosità massima abbastanza ben definita. Sfortunatamente esse si sono rivelate finora imprevedibili, e la loro scoperta avviene in ricerche di routine su lastre fotografiche anche dopo parecchi mesi dalla comparsa dell'evento: è raro che si possa seguire con cura l'evoluzione temporale di una supernova, o, addirittura, che la si possa scoprire prima che abbia raggiunto il massimo della luminosità.

Un secondo metodo è quello di considerare che in una galassia esistono oggetti assai piú brillanti delle stelle normali, costituiti da nuvole di idrogeno ionizzato che avvolgono alcune stelle calde e brillanti. I piú luminosi tra questi oggetti (detti regioni H II brillanti, dove H II indica convenzionalmente l'idrogeno ionizzato) hanno una luminosità (assoluta) e dimensioni abbastanza ben definite, e permettono quindi di determinare la distanza della galassia ospite. Ora, come abbiamo detto, in un ammasso di galassie non tutti gli elementi sono uguali: vi si possono distinguere diverse classi morfologiche di oggetti simili. Un gruppo di oggetti caratteristici (le cosiddette galassie di tipo ScI) ha una luminosità particolarmente grande e ben definita. Queste galassie hanno un piccolo nucleo e bracci spirali non avvolti strettamente e ricchi di regioni H II brillanti. La non difficile identificazione di una di queste galassie in un ammasso di galassie lontane permette di stabilirne la distanza.

Neppure l'ultimo metodo che esporremo era stato previsto. Già era stato

notato intorno al 1915 da Slipher che la maggior parte delle galassie di cui è possibile determinare il moto appare allontanarsi da noi. La determinazione della velocità di recessione avviene sfruttando il noto effetto Doppler: la frequenza di sorgenti di onde sonore o luminose aumenta (spostamento verso il blu) se la sorgente si avvicina all'osservatore, e diminuisce (spostamento verso il rosso o *redshift*) se la sorgente si allontana. La scoperta di Slipher fu poi confermata da ulteriori analisi: escluse alcune galassie vicine, si osservò che tutte le galassie si allontanano, a velocità crescenti, proporzionalmente alla distanza. Tale è la scoperta di Hubble (1929), che offrí all'astronomo un nuovo mezzo per determinare le distanze e al cosmologo un nuovo mondo di speculazioni. Infatti è chiaro che se si riesce ad ottenere lo spettro, questa volta non di una sola stella ma di tutta la galassia, e si identificano le righe caratteristiche di qualche elemento fisico, un semplice confronto delle frequenze osservate con quelle di una sorgente di laboratorio permette di determinare la velocità della galassia, e da questa si risale alla distanza grazie alla relazione scoperta da Hubble: $v=Hd$, dove v è la velocità, H la costante di Hubble, d la distanza.

Ad esempio, sia la costante di Hubble (in realtà a tutt'oggi non ancora ben determinata) di 100 km sec^{-1} Mpc^{-1} (1 Mpc $\simeq$ 3 milioni di anni luce). Una velocità di 1000 km/sec significa allora che la sorgente è a dieci megaparsec di distanza (cioè trenta milioni di anni luce). In termini di *redshift* z, bisogna tener presente che, per piccoli valori di z, si ha $z \simeq v/c = Hd/c$ dove c è la velocità della luce, che è di circa 300 000 km/sec.

Quando si dice allora che una sorgente ha un *redshift* $z=0{,}01$, se ne può ricavare che la sua velocità è $v \simeq cz \simeq 3000$ km/sec, e quindi la distanza è trenta megaparsec. La taratura della relazione di Hubble è tuttora incompleta: il valore di questa costante è variato di un fattore 8 negli ultimi quarant'anni. L'importanza concettuale del metodo è tuttavia indiscutibile. Potrebbe sembrare, a prima vista, che la relazione di Hubble implichi, in fondo, un ritorno a visioni antropocentriche. Un esame piú approfondito rivela invece che ciò non è vero. Infatti, si consideri una galassia che si trovi a distanza $\mathbf{r}_g$ da noi, la sua velocità sarà, per la legge di Hubble, $\mathbf{v}_g = H\mathbf{r}_g$. Per un osservatore su questa galassia una terza galassia, che rispetto a noi si muove con velocità $\mathbf{v}=H\mathbf{r}$, sembrerà muoversi con velocità $\mathbf{v}-\mathbf{v}_g = H(\mathbf{r}-\mathbf{r}_g)$. Poiché la galassia prescelta per il confronto è arbitraria, ne segue subito che la legge di Hubble è vera per qualsiasi osservatore.

Sono probabilmente noti al lettore gli ulteriori sviluppi di questa vicenda intellettuale. Intorno al 1960 furono scoperti oggetti speciali, che appaiono puntiformi (o quasi) nei telescopi a maggiore risoluzione, e quindi simili nell'aspetto a stelle, ma dotati di uno spettro del tutto inedito. Schmidt nel 1963 propose infine trattarsi di oggetti ad alto *redshift*, di gran lunga superiore a quello delle galassie note. Con le dovute riserve, questa interpretazione diede i suoi frutti: è questa la scoperta degli oggetti quasi stellari o quasar (QSO). Sorgenti a *redshift* sempre piú alto vengono scoperte in continuazione: ne sono state osservate fino a valori di $z=4$. Il lettore a questo punto noterà che $z=4$ sembra significare che la velocità della sorgente è circa quattro volte la velocità della luce, un fatto notoriamente proibito dalla teoria della relatività ristretta. In realtà la

relazione $v=cz$ vale solo per valori piccoli di z. Per riferire v a z per grandi valori di z non è in genere sufficiente la relazione completa data dalla relatività ristretta: occorre anche specificare un «modello cosmologico».

Si noti che questo è uno dei problemi della cosmologia, la quale richiede un modello per assegnare le distanze, mentre al tempo stesso utilizza le distanze per costruire il modello.

Le altre astronomie (radio, X, γ, ecc.) non forniscono in genere mezzi attendibili per determinare le distanze, per quanto non manchino valutazioni: anche qui, per esempio, si cerca di isolare oggetti di luminosità (radio, X, γ, ecc.) ben definita; oppure si ricorre allo studio delle modificazioni a cui il segnale elettromagnetico è sottoposto propagandosi in un mezzo di cui si suppongono note le caratteristiche. In ogni caso il metodo piú sicuro consiste nell'identificare la sorgente (radio, X, γ, ecc.) con una sorgente ottica, che invece si presta in genere ad una piú accurata determinazione della distanza.

Si darà infine un brevissimo e rozzo saggio dell'importanza concettuale della costante di Hubble. Supponiamo di avere un universo limitato dalla relatività ristretta: in questo caso non potranno esistere oggetti con velocità superiore a quella della luce, che è di 300 000 km/sec. A che distanza dall'osservatore saranno questi oggetti? Applicando la relazione di Hubble $v=Hd$, senza troppo preoccuparsi della sua validità per grandi valori di v, si trova: $d=(300\,000/100)$ Mpc $=3000$ Mpc, dieci miliardi di anni luce. In un tale universo, dunque, questa distanza si comporta a tutti gli effetti come un raggio dell'universo. Nessun oggetto piú distante potrà in qualche modo segnalarci la sua presenza. Il ragionamento è rozzo, ma sostanzialmente questo valore del raggio dell'universo (ove questo sia considerato come finito) è il valore normalmente accettato. La costante di Hubble definisce anche una scala temporale: poiché la velocità è data da una distanza divisa per un tempo, dalla relazione di Hubble appare che $v=d/T$. Ad esempio, si può chiedere: quanto tempo ha impiegato la luce a raggiungerci da un oggetto «al confine dell'universo»? La risposta è: $T=(3000\text{ Mpc})/(300\,000$ km/sec). Bisogna tener conto delle differenti unità di misura. Possiamo dire che la velocità della luce è 1 anno luce all'anno, e 3000 Mpc sono circa 10 miliardi di anni luce. Quindi $T=(10$ miliardi di anni luce$)/(1$ anno luce/anno) e quindi $T=10$ miliardi di anni. L'oggetto dunque esisteva 10 miliardi di anni fa. Di nuovo, nonostante il ragionamento del tutto semplicistico, questa è la scala dei tempi normalmente accettata per l'evoluzione dell'universo. L'osservazione di Hubble e poco altro ci hanno dato dunque due numeri straordinari, la risposta a millenni di domande. Ma ora si pongono altri interrogativi: questa espansione è apparente o reale? E poi, perché l'universo si espande? Perché si espande con questo valore di H? È H un valore costante o variabile nel tempo? Ogni modello cosmologico che si rispetti deve anche dare una risposta a questi problemi.

2.3. L'età dell'universo.

È opportuno chiarire subito che cosa si intende per età dell'universo. Intanto bisogna affermare che ciò ha un senso solo se nel modello cosmologico utiliz-

zato è ammessa una singolarità iniziale, cioè un momento in cui le condizioni «normali» della materia non sono le attuali, ma sono completamente diverse. In questo senso l'età dell'universo è l'intervallo di tempo in cui si suppone che le leggi della fisica abbiano lo stesso significato che hanno ora sulla Terra. Che questo dato non vada preso in senso assoluto può essere chiarito dal seguente esempio, ormai classico fra coloro che si interessano di cosmologia. Si supponga di osservare una città della Terra per un tempo limitato rispetto sia all'età della Terra sia all'età della città; per esempio un anno. Se la città è una delle piú antiche della Terra, questo dà ancora un'idea per difetto della sproporzione che può esistere fra l'età dell'universo e la durata delle nostre osservazioni su di esso; rapporto che è circa $2 \cdot 10^{10}/200 = 10^8$, con la presente stima dell'età dell'universo e se si considera che dal 1700 circa si hanno osservazioni astronomiche accurate.

Ora, in queste osservazioni si possono fare due tipi di errore nella stima dell'età della città. Il primo dovuto ad una estrapolazione di dati osservati: per esempio, attribuire l'età media degli abitanti all'età della città. Il secondo tipo di errore può essere dovuto al modello: supponiamo di poter dedurre dall'incremento annuo che la popolazione della città raddoppi in circa venticinque anni; una semplice legge permette di stabilire in quanti anni si è raggiunto il numero attuale di abitanti (N) partendo da due (numero minimo per potersi moltiplicare). Si ha:

$$\text{età della città} = \left(\frac{\log N}{\log 2} - 1\right) \times 25 \text{ anni.}$$

Ma come ognuno può verificare sostituendo i dati necessari per la propria città, in generale la stima cosí ottenuta è erronea. Chiarito questo si può tornare a parlare dell'età dell'universo. Le osservazioni fattibili attualmente possono solo assegnarne limiti inferiori: assegnare l'età di oggetti celesti vicini (la Terra o la stessa Galassia) non esclude che altre generazioni di oggetti simili siano esistite in precedenza. Questa ovvia osservazione fu addirittura essenziale a suo tempo nello stimolare gli astronomi a nuove osservazioni per diminuire (se possibile) il valore della costante di Hubble che, come si è detto, definisce una scala dei tempi per l'evoluzione dell'universo. Quanto piú grande è la costante di Hubble, tanto piú breve è l'età dell'universo. I primi valori assegnavano appunto all'universo una età inferiore all'età della Terra. Come si determinano le età degli oggetti celesti? Ci sono diverse valutazioni, tutte alquanto delicate. Per la Terra, come è noto, si osserva qual è la percentuale di uranio e torio in una roccia che contenga anche i loro prodotti di decadimento radioattivo. Poiché le relative percentuali dei materiali radioattivi e dei loro prodotti di decadimento dipendono in modo univoco dal tempo di formazione del materiale, l'età di questo resta determinata. Le rocce piú vecchie sulla Terra indicano un'età di alcuni miliardi di anni. Tale almeno deve essere l'età della Terra e, a maggior ragione, l'età dell'universo. Questo stesso metodo può essere applicato alle meteoriti, che dovrebbero essere state formate insieme alla Terra, o, forse, all'epoca della formazione del sistema solare. Si misura in particolare il rapporto $^3He/^4He$ tra l'elio

con un solo neutrone (radioattivo) e l'elio con due neutroni (stabile). Il risultato è di nuovo di alcuni miliardi di anni. Oltre a queste valutazioni dirette, esistono altre valutazioni che si basano su teorie, e dipendono solo indirettamente dalle osservazioni. Ad esempio, si può stimare l'età minima delle stelle oggetto di osservazione: si sa che esiste una relazione fra massa e luminosità di una stella. Secondo questa relazione, stelle di massa maggiore bruciano idrogeno piú in fretta. Quando una stella ha bruciato abbastanza idrogeno tramutandolo in elio, ci si aspetta che il suo raggio aumenti. Ora, non esistono stelle di piccola massa e grande raggio: questo vuol dire che le stelle di piccola massa non hanno avuto il tempo di bruciare abbastanza idrogeno. Le stelle di massa piú piccola tra quelle che hanno raggi estesi definiscono quindi un limite inferiore all'età delle stelle piú vecchie che si sono osservate. Il valore che si ottiene è circa doppio di quelli precedenti, ma naturalmente si tratta di un metodo piú impreciso e piú incerto, in quanto dipende da un certo numero di teorie. Sono pure basati sulla teoria dell'evoluzione stellare i metodi per determinare l'età di un ammasso stellare. Esistono inoltre metodi dinamici che si basano su ipotesi piú o meno accettabili: ad esempio il tempo che occorre ad una galassia per attraversare l'ammasso a cui appartiene (si ricordi che l'effetto Doppler permette di determinare la velocità radiale di una galassia) è dell'ordine di 1 megaparsec (tipico raggio di un ammasso) diviso 300 km/sec (tipica velocità di una galassia); se ne deduce un'età di circa 3 miliardi di anni. E cosí via.

L'analisi del tempo di formazione della polvere interstellare, e l'analisi del tempo di formazione degli elementi chimici (cfr. § 4.5), ancora producono dati di qualche miliardo di anni. Per quanto tutte le evidenze sembrino condurci ad un universo che ha un'età di circa 20 miliardi di anni, è da osservare ancora una volta che non si può escludere che l'universo sia eterno. I dati elencati si possono riferire soltanto ad oggetti relativamente vicini, e quindi ad una fase per noi importante, ma comunque locale e transitoria dell'universo.

2.4. La composizione dell'universo.

Nel 1835 Auguste Comte affermò che è insensato chiedersi di che cosa siano composte le stelle, perché l'uomo non potrà mai esplorarle. Questa affermazione piú volte citata a tutto svantaggio dell'illustre fondatore della sociologia è forse piú notevole per la sua sfortuna che per la sua arroganza, in quanto essa giunge proprio nel mezzo del periodo di elaborazione dello strumento piú insigne di analisi della composizione dei corpi terrestri e celesti: l'analisi spettroscopica. Wollaston, nel 1802, aveva osservato la luce solare rifratta attraverso un prisma, e vi aveva scoperto (vedi caso) sette righe nere, che in un primo tempo furono credute delimitare i colori. Con strumenti assai piú raffinati, e disegnati da lui stesso, l'ottico bavarese Fraunhofer nel 1815 scoprí invece che sullo spettro solare comparivano migliaia di righe scure, piú o meno intense. Lo studio di questo fenomeno occupò quarant'anni e culminò con le ricerche di Bunsen, Kirchhoff ed altri, che ne diedero la corretta interpretazione. Si era osservato che vapori emessi da un elemento chimico non presentano uno spettro

continuo, ma solo poche righe brillanti in posizioni ben definite per ogni elemento (righe di emissione). Ora, le righe oscure osservate nello spettro solare erano nei punti precisi (cioè alle lunghezze d'onda) in cui si sarebbero dovute vedere le righe luminose caratteristiche di diversi elementi. Si concluse quindi che un dato elemento «assorbe» radiazione esattamente alle stesse frequenze (o lunghezze d'onda) a cui l'emetterebbe. Nel caso in esame si poteva pensare ad una atmosfera di gas piú freddo interposta fra l'osservatore e la superficie incandescente del Sole. La maggiore o minore intensità delle righe doveva essere in relazione con l'abbondanza dei singoli elementi. In questi centosettant'anni la spettroscopia ha compiuto progressi ragguardevoli. Si riesce ad analizzare in dettaglio lo spettro di lontanissime galassie e di corpi celesti meno facilmente classificabili. Fra i risultati notevoli possiamo ricordare i seguenti:

a) la scoperta di nuovi elementi chimici (l'elio fu scoperto prima sul Sole che sulla Terra con le osservazioni di Janssen e di Lockyer nel 1868);
b) la deduzione (con l'aiuto di opportuni modelli) delle abbondanze di elementi nelle atmosfere stellari;
c) la classificazione delle stelle in classi spettrali, opera iniziata da Secchi con la sua suddivisione delle stelle in quattro tipi (1863) e culminata con la costruzione del diagramma di Hertzsprung-Russell;
d) la determinazione dei campi magnetici stellari per mezzo dell'effetto Zeeman;
e) l'utilizzazione dell'effetto Doppler per la determinazione delle velocità relative fra sorgente ed osservatore, lungo la linea di vista (velocità radiali). Di qui la determinazione delle distanze stellari per mezzo dei moti propri, e della distanza delle galassie per mezzo della legge di Hubble.

Come si vede non è esagerato affermare che la spettroscopia forma il nucleo dell'astrofisica moderna. Di qui discende infine il lavoro di sintesi della determinazione delle abbondanze degli elementi in tutto l'universo, frase in verità alquanto ottimistica. Si riportano alcuni risultati nella tabella 1.

Nell'ultima colonna della tabella figurano dati ottenuti attraverso l'analisi diretta delle abbondanze nei raggi cosmici. Lo studio di questi ultimi iniziò negli anni 1911-13 ad opera di Hess e Kolhoerster. Si tratta di particelle cariche (elettroni, protoni e nuclei di altri elementi) di energia altissima presenti nello spazio interstellare e, forse, intergalattico. Le sorgenti sono sostanzialmente ignote (le supernovae?) e le modalità della propagazione pure. In ogni caso, nel loro viaggio attraverso lo spazio interstellare, i raggi cosmici devono scontrarsi con atomi di gas, che sappiamo presente, e modificare la propria composizione. Ci si aspetta infatti che in queste collisioni i nuclei piú pesanti si «sfascino», producendo nuclei piú leggeri. Se si osserva la tabella riportata si vede che i nuclei leggeri (L) sono molto piú abbondanti nei raggi cosmici che nell'universo in generale, in accordo con questa ipotesi. L'osservazione qualitativa viene confermata dai calcoli: le abbondanze dei raggi cosmici alla sorgente non devono essere molto differenti dalle abbondanze universali. Strettamente parlando, però, non possiamo affermare categoricamente che esse siano va-

Tabella 1.

La tabella riporta le abbondanze degli elementi nell'universo e nei raggi cosmici, rispetto all'idrogeno (p). Z è il numero atomico, α è l'elio. L, M, P, MP rappresentano rispettivamente i nuclei leggeri, medi, pesanti, molto pesanti.

Fonte: V. L. Ginzburg e S. I. Syrovatskii, *The Origin of Cosmic Rays*, Pergamon Press, Oxford 1964.

Gruppi di nuclei	*Universo*	*Raggi cosmici*
p (Z= 1)	1	1
α (Z= 2)	$8 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$
L ($3 \leq Z \leq 5$)	$3 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-3}$
M ($6 \leq Z \leq 9$)	$8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
P ($10 \leq Z \leq 20$)	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
MP ($Z \geq 21$)	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$

lide fuori della nostra galassia. Alfvén e Klein prendono una posizione estrema: non è possibile neppure essere sicuri che le vicine stelle siano composte predominantemente di materia, come il nostro sistema solare, e non di antimateria. Infatti l'antimateria si comporterebbe esattamente come la materia rispetto all'analisi spettroscopica: ciò non è vero invece per i raggi cosmici, che vengono osservati direttamente e in cui, in linea di principio, si possono distinguere i protoni, gli antiprotoni e i nuclei di antimateria. È l'analisi dei raggi cosmici che esclude l'ipotesi di Alfvén, almeno per la nostra galassia. Tuttavia non si può escludere con sicurezza che nell'universo materia e antimateria appaiano in quantità uguali, e si separino in seguito per mezzo di complessi processi. Il modello di Alfvén e Klein è stato elaborato solo in parte. Nella sua forma attuale, però, mentre si guadagna in simmetria fra materia e antimateria, si perde in simmetria spaziale, che richiederebbe l'equivalenza fra tutti i punti dell'universo. Questo universo è infatti un «universo - isola», in uno spazio assoluto euclideo vuoto. I punti ai confini dell'universo non sono equivalenti a quelli all'interno. Quindi, almeno esteticamente, ciò che si guadagna da un lato, si perde dall'altro.

L'ultima notevole osservazione sulla composizione è che l'idrogeno predomina. Poiché si tratta del nucleo piú semplice, si può pensare che esso sia per cosí dire l'elemento primevo, che da esso siano stati prodotti tutti gli altri elementi, e che l'idrogeno osservato sia quello «avanzato» da queste reazioni. Si pone dunque il problema dell'origine degli elementi, almeno per i modelli in cui l'universo ha un inizio. Vi sono modelli cosmologici i quali prevedono uno stato iniziale superdenso, ad altissima temperatura e in rapida espansione, in cui le reazioni nucleari di fusione avvengono con estrema rapidità. Aumentando l'espansione, gli scontri fra particelle, e quindi le reazioni di fusione, divengono sempre meno probabili, fino a che, praticamente, cessano. I modelli cosmologici di questo tipo incontrano difficoltà circa la produzione di elementi piú pesanti dell'elio. Un'analisi piú accurata di tutte le possibili reazioni di fusione

ha però permesso di ipotizzare una produzione di elementi piú pesanti dell'elio. Per gli elementi piú pesanti del ferro, inaspettatamente, il problema è meno grave: essi verrebbero elaborati all'interno delle stelle durante le varie fasi dell'evoluzione stellare. Il problema della produzione degli elementi leggeri rimane invece la pietra di paragone dei modelli cosmologici di tipo *big bang*.

3. *Considerazioni moderne su osservazioni antiche.*

In questa faticosa costruzione dei mezzi necessari per affrontare il problema cosmologico, le delicate osservazioni che abbiamo riassunto piú sopra non bastano: sono anche indispensabili alcune considerazioni sullo spazio, sul tempo e sull'inerzia.

In generale sono i fatti inconsueti quelli che costituiscono un problema; non è cosí per quelli che fanno parte dell'esperienza quotidiana. Le domande su questi ultimi fenomeni sono però le piú profonde. Si presenteranno ora tre problemi di primaria importanza nella cosmologia moderna.

3.1. Dimensionalità dello spazio e del tempo.

Perché lo spazio ha tre dimensioni (cioè occorrono tre numeri per determinare in modo univoco la posizione di un oggetto)? A questa domanda è difficile rispondere, per quanto ci siano diverse osservazioni interessanti. Se ci fossero piú di tre dimensioni non sarebbero possibili orbite planetarie stabili. Se ci fossero meno di tre dimensioni non sarebbero possibili cervelli come il nostro. In conclusione, in nessuno dei due casi potrebbero esistere esseri simili a noi, e quindi in grado di dare la nostra descrizione dell'universo. Questo sembrerebbe suggerire che la percezione di tre dimensioni spaziali rifletta un dato oggettivo e non un limite fisico dei nostri strumenti di senso. Nel secolo scorso si credeva, ad esempio, che il numero di canali semicircolari nell'orecchio interno fosse connesso con le dimensioni percettibili. Si narra di biopsicologi che impazzirono studiando la percezione del mondo di certi topi giapponesi, forniti di due soli canali semicircolari.

Ci si può anche chiedere perché il tempo ha una sola dimensione. (Gli orologi dànno una sola serie di numeri, e gli eventi possono essere ordinati, sotto certe condizioni, secondo questa successione). Anche a questa domanda non c'è una reale risposta. Se esistessero piú dimensioni temporali che a noi appaiono come una sola per un effetto di proiezione, fenomeni interessanti potrebbero verificarsi. Ad esempio due fenomeni potrebbero apparire coincidenti nel tempo e nello spazio, senza in realtà esserlo.

Queste prime due domande avrebbero potuto essere poste già nell'antichità, ma non risulta che ciò sia stato fatto. Non è lo stesso per le domande successive, che diedero luogo al paradosso di Olbers ed al principio di Mach.

3.2. Il paradosso di Olbers.

Il fatto che di notte sia buio fa parte dei dati abituali della nostra sensazione. Questo non stupiva gli antichi, che ragionavano in termini di stelle fisse su di una volta, o comunque sulla base di modelli primitivi, ma incominciò ad interessare i moderni appena si vennero evolvendo il concetto di stella e di universo. Già Galileo nel 1638 faceva osservare che le stelle non potevano ragionevolmente essere tutte alla stessa distanza, ma dovevano essere sparpagliate nel cielo. Come abbiamo rilevato precedentemente egli stesso aveva suggerito nel 1610 che la Via Lattea fosse costituita da miriadi di stelle lontanissime. Cosí si fece strada l'opinione che il Sole non fosse altro che una stella come le altre e che esse fossero distribuite nell'universo. Huygens poi riproponeva con chiarezza il suggerimento, già antico, che l'universo fosse infinito, proprio basandosi sull'ipotesi che tutte le stelle fossero uguali al Sole. Gli era infatti noto (come a questo punto dovrebbe anche essere noto al lettore) che il flusso luminoso F emesso da una sorgente puntiforme di luminosità L e raccolto su di una superficie di 1 centimetro quadro è inversamente proporzionale al quadrato della distanza (d) della sorgente: $L/4\pi d^2 = F$. Sirio, la stella apparentemente piú luminosa, settecentosessantacinque volte meno luminosa del Sole, doveva essere a una distanza $d = \sqrt{765} = 27{,}7$ volte la distanza solare. (Questo risultato non è corretto, perché Sirio in realtà è intrinsecamente assai piú luminosa del Sole, e quindi è assai piú distante). Comunque le stelle piú deboli dovevano essere assai piú lontane, e siccome i cannocchiali svelavano stelle sempre meno luminose in modo inesauribile, Huygens poteva suggerire che l'universo fosse infinito. A questo punto il terreno è pronto per il paradosso di Olbers (1826), già enunciato da Halley nel 1720 e da Chéseaux nel 1744. Se l'universo è infinito, e le stelle vi sono distribuite uniformemente con la densità di n stelle per unità di volume, ci si deve aspettare che il cielo notturno sia brillante come il disco solare.

Infatti il flusso al centro di un guscio di raggio r e spessore Δr (molto minore di r) è dato dal numero di stelle nel guscio ($N = n\,4\pi r^2\,\Delta r$) moltiplicato per il flusso ricevuto da ogni stella del guscio ($F = L/4\pi r^2$), dato che possiamo considerarle tutte alla stessa distanza r. Il flusso totale ricevuto da questo guscio è

$$F_{\text{guscio}} = (n\,4\pi r^2\,\Delta r)\,\frac{L}{4\pi r^2} = nL\,\Delta r.$$

Si ottiene quindi il risultato che per ogni guscio di spessore Δr, il flusso F_{guscio} ricevuto al suo centro è costante, indipendentemente dal raggio r. Per una sfera di raggio grandissimo R, allora, si avrà:

$$F_{\text{sfera}} = F_{\text{guscio}} \cdot (\text{Numero gusci}) = F_{\text{guscio}} \cdot \frac{R}{\Delta r} = nLR.$$

Se il raggio dell'universo è infinito, si ha $F_{\text{sfera}} = \text{infinito}$. In questo ragionamento si è però trascurato il fatto che la luce di stelle lontane viene intercettata dalle stelle vicine. Introducendo comunque questa considerazione nei conti, si tro-

va che tutto il cielo dovrebbe brillare come il disco solare. Bisogna aggiungere che a questa conclusione si giungerebbe lo stesso se ci si trovasse in un universo dove non valga la geometria euclidea, e cioè una geometria in cui F non è dato da $L/4\pi d^2$ (ma in questo caso anche il volume dei gusci sarebbe diverso da quello dato da noi). Per uscire da questo paradosso si possono proporre alcune soluzioni:

a) La densità media delle stelle e la loro luminosità media variano attraverso lo spazio. Questa affermazione ripropone il vecchio ideale antropocentrico e cioè che noi ci troviamo in una regione privilegiata o comunque differente dalle altre. Tale punto di vista è ormai rifiutato in generale, in virtú del «principio cosmologico» che sarà chiarito in seguito.

b) La densità media delle stelle e la loro luminosità media varia nel tempo. Qui occorre ricordare un fatto che certo il lettore conosce, e che svolge un ruolo importante nelle speculazioni cosmologiche: noi non vediamo un corpo celeste come è ora (al nostro istante di tempo), ma come era nel momento in cui da esso partí la luce che ci raggiunge ora. Quindi vediamo la galassia di Andromeda, che è a due milioni di anni luce di distanza, non come è nell'anno 1978 d. C., ma come era due milioni di anni fa. Possiamo allora pensare, per esempio, che le stelle si siano «accese» in un certo istante (T) nel passato: possiamo ricevere luce quindi solo da una sfera di raggio $R=cT$ (la distanza che la luce può percorrere in un tempo T se viaggia con velocità costante c), e il valore $F=nLcT$ può essere cosí posto in accordo coll'esperienza per opportuni valori di n, e di T.

c) Le sorgenti luminose si allontanano da noi. Qui entra in gioco di nuovo l'effetto Doppler, secondo cui in tal caso viene ridotto il flusso di energia emesso da una sorgente o raccolto su di una unità di area. L'interpretazione quantistica della radiazione luminosa afferma che essa consiste in un certo numero di quantità fondamentali (quanti di luce) di una data energia, per secondo. Una riduzione del flusso di energia luminosa dovuta all'effetto Doppler consiste in una rarefazione dei quanti luminosi (ne arrivano di meno per secondo) ed in una riduzione della loro frequenza (il colore della luce diviene piú rosso). Se dunque le sorgenti piú lontane si allontanano piú velocemente da noi, il flusso che riceviamo dai gusci piú distanti è inferiore a quello ricevuto dai piú vicini, ed il flusso totale può avere un valore finito anche se l'universo ha dimensioni infinite. Una ipotesi di una recessione delle sorgenti luminose lontane sarebbe apparsa quasi incredibile a coloro che per primi studiarono il paradosso di Olbers. Tuttavia sappiamo che è proprio quanto accade.

d) Tutte queste ipotesi sono comunque inutili se si afferma che le leggi della fisica valide sulla Terra o nella nostra porzione di universo sono diverse da quelle valide altrove. Questa ipotesi, per quanto ammissibile, suona sgradevole all'orecchio del fisico perché lascia aperte troppe diverse possibilità tra cui è difficile scegliere. Ci si può limitare ad introdurre il numero minimo di varianti. Il cosiddetto «universo cinematico», dovuto a Milne, introduce due diversi computi del tempo, rispettivamente validi per osservatori in quiete o in moto relativo.

Riassumendo le proposte piú accettabili, cioè la *b* e la *c*, si può dire che il paradosso di Olbers è risolto se l'universo è «giovane» (almeno nella sua fase attuale) o se si espande. Non a caso il modello presentemente piú soddisfacente (il *big bang*) fa sue entrambe le proposte.

3.3. Il problema dell'inerzia e il principio di Mach.

Si è visto che perché fosse introdotto il paradosso che porta il nome di Olbers, occorrevano due concetti nuovi oltre al dato di fatto che la notte è scura: cioè che il Sole non sia diverso dalle altre stelle e che l'universo sia infinito. Si è anche fatto notare che questi concetti sono il frutto di una lunga elaborazione. Lo stesso avviene per il cosiddetto principio di Mach (1893). Qui il concetto necessario è il concetto di inerzia o di massa, che, in forma rigorosa, non può essere fatto risalire a prima di Newton. Il problema che Mach affrontò con chiarezza era infatti già stato posto da Newton stesso, nella sua ricerca se fosse possibile determinare una rotazione «assoluta». Classicamente un osservatore in un laboratorio (per esempio una nave) che si muove di moto rettilineo e a velocità costante non può rendersi conto di questo moto per mezzo di esperimenti di meccanica all'interno del laboratorio (cfr. § 4.2). Viceversa, se il laboratorio ruota uniformemente rispetto a un asse qualunque, accade notoriamente ogni sorta di fenomeni strani che può mettere in sospetto gli abitanti del laboratorio.

Sembra allora possibile determinare il moto di rotazione uniforme in senso assoluto. Newton propose l'esperimento che porta il nome di «secchio di Newton». Lo sperimentatore, in una notte nebbiosa, faccia ruotare intorno al suo asse verticale un secchio pieno d'acqua. Se la rotazione dell'involucro inizia all'improvviso, in un primo tempo (1) avremo il secchio ruotante e l'acqua ancora a riposo rispetto ad esso. Poi la viscosità dell'acqua trasmetterà il moto di rotazione dal secchio al liquido ed avremo (2) acqua e secchio a riposo l'uno rispetto all'altro. Tuttavia la superficie dell'acqua assumerà una forma speciale (un paraboloide di rivoluzione) come ognuno può verificare in proprio.

Infine si arresti bruscamente l'involucro del secchio; ora (3) l'acqua sarà in rotazione rispetto al secchio, e la sua superficie continuerà a mantenere la forma a paraboloide di rivoluzione. Ma si noti che tanto nella fase 1 quanto nella fase 3 acqua e secchio ruotano l'uno rispetto all'altro. Tuttavia la situazione non è simmetrica: nel primo caso la superficie dell'acqua è piana, nel secondo è incurvata. Newton concluse che era possibile determinare una rotazione in senso assoluto. Ci deve dunque essere un tipo di «laboratorio» privilegiato che può essere assunto come non ruotante: i fenomeni strani appaiono nei laboratori che ruotano rispetto ad esso. A questo punto, mentre la fase 3 è in corso, le nebbie si dileguano. Lo sperimentatore noterà con somma sorpresa che la superficie si incurva proprio quando il liquido ruota rispetto alle stelle fisse. È questa una coincidenza? Secondo Mach l'osservatore sarebbe giustificato se concludesse che sono le stelle lontane ad esercitare una sorta di azione sui corpi che si trovano in laboratorio. Nasce dunque l'opinione che siano le proprietà globali dell'universo a determinare le proprietà di un corpo in un laboratorio terrestre.

Questa ipotesi assume diverse facce: il principio di Mach afferma che la massa inerziale di un corpo è determinata dalla distribuzione di tutte le masse nell'universo e ciascuna di esse, a sua volta, è determinata da tutte le altre. In un universo, alquanto noioso ma pensabile, che consistesse di un'unica particella in uno spazio infinito, questa dovrebbe necessariamente avere massa zero.

Mach non specificò che genere di azione esercitino le masse lontane: qualunque essa sia, ad ogni modo, ne viene la conclusione inevitabile che se l'universo non fosse isotropo, cioè non avesse proprietà uguali in tutte le direzioni (per esempio se ci fossero piú stelle o piú galassie in una certa porzione dell'universo), la massa di un corpo dovrebbe assumere valori diversi secondo la direzione dell'accelerazione. Un fatto curioso è che finora non è stato possibile assegnare al principio di Mach una formulazione matematica globale e coerente. La teoria della relatività generale realizza il principio di Mach soltanto facendo opportune ipotesi aggiuntive. Altre teorie piú recenti che hanno cercato di incorporare questo principio con maggiore o minore successo, sono dovute a Sciama, ed a Hoyle e Narlikar.

Il principio di Mach non è accettato da tutti, e non allo stesso modo. Esso ha costituito comunque la base di una costruttiva discussione, ed ha suggerito simili principî per spiegare altre proprietà dei corpi oltre alla massa inerziale.

4. *La cosmologia moderna.*

Esamineremo ora le due rivoluzioni che sono state decisive per la formulazione matematica e fisica dei modelli cosmologici moderni, per illustrare quindi come questi rivolgimenti confluiscano nella relatività generale che a sua volta permette di inquadrare ed investigare in modo completo i vari problemi relativi ai modelli cosmologici.

4.1. La rivoluzione geometrica.

Possiamo tracciare una genealogia del pensiero cosmologico moderno dicendo che il problema si crea quando compaiono le geometrie non euclidee. Non è nostro scopo né nostra competenza stabilire priorità storiche: dovremmo citare tuttavia l'opera di Gauss sulle superfici curve, e l'opera di Riemann. È con essi che viene introdotto il concetto di metrica, generalizzazione, in un certo senso, del teorema di Pitagora. Prima però di entrare nel vivo dell'argomento, è opportuno discutere brevemente che cosa si intende per sistema di coordinate. Ad esempio, le città sulla superficie terrestre hanno nomi indipendenti, Torino, Milano, Tōkyō. Questo sistema per distinguere i punti della superficie terrestre è tuttavia scomodo in quanto, in base al nome, non possiamo stabilire, per esempio, che Torino è piú vicina a Milano che a Tōkyō. Sappiamo bene che per poter fare ragionamenti del genere è assai piú utile introdurre un sistema di coordinate. Poiché la superficie terrestre è bidimensionale, basteranno due numeri, per esempio longitudine e latitudine. Sfruttiamo meglio questa

analogia: si noti in primo luogo che dalla latitudine e longitudine (da sole) non può esser dedotta la distanza in chilometri fra due punti della superficie terrestre. Occorre un altro dato, per esempio il raggio della Terra. In piú, la formula per calcolare questa distanza non è elementare. In secondo luogo si noti che ci sono due punti, il Polo nord ed il Polo sud, in cui il sistema di coordinate fallisce. Infatti di questi punti è definita la latitudine, che è 90°, ma non la longitudine (tutti i meridiani si incontrano ai due poli). Questi due punti sono detti «singolari». Si noti però che la singolarità risiede nel sistema di coordinate scelto, non nella struttura della superficie: i due poli sono punti come tutti gli altri. Per altre superfici possono esistere punti effettivamente diversi: buchi, punte, ecc. Si tratta qui di un altro tipo di singolarità, se vogliamo, piú interessante. Sul piano abbiamo gli abituali sistemi cartesiani: un foglio a quadretti esteso all'infinito ne è l'esempio piú caratteristico. Qui non ci sono singolarità: ogni punto ha associati due e solo due numeri; la distanza fra due punti può essere calcolata, appunto, per mezzo del teorema di Pitagora (cfr. fig. 5).

Questo teorema può essere enunciato dicendo che la distanza fra due punti A e B è data, in coordinate cartesiane ortogonali nel piano, da

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2.$$

Secondo Riemann in un qualsiasi sistema di coordinate (anche non cartesiane ortogonali) la generalizzazione piú semplice, ma già ricca di nuove conseguenze, è la seguente:

$$\Delta s^2 = g_{xx}\Delta x^2 + g_{xy}\Delta x\Delta y + g_{yx}\Delta_y\Delta_x + g_{yy}\Delta y^2$$

(nel caso precedente $g_{xx}=1$, $g_{xy}=0$, $g_{yy}=1$). Questa forma è generale e si applica a differenti coordinate purché si studino intervalli molto piccoli (a rigore infinitesimi). Possiamo allora scrivere ds^2 in termini di qualsiasi sistema ragionevole di coordinate come

$$ds^2 = g_{11}\,dx_1^2 + g_{12}\,dx_1\,dx_2 + g_{21}\,dx_2\,dx_1 + g_{22}\,dx_2^2.$$

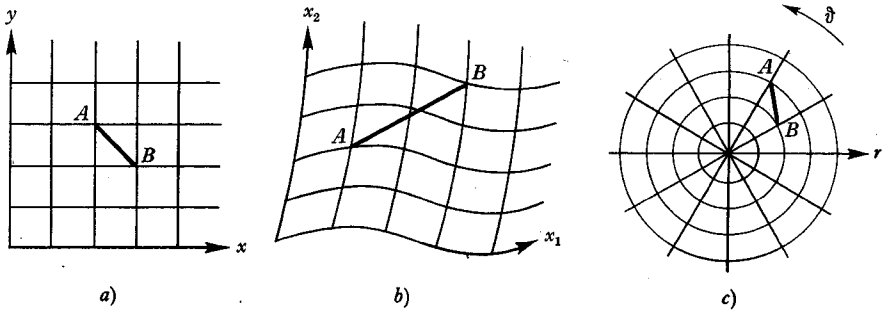


Figura 5.

Alcuni sistemi di coordinate nel piano e distanze fra due punti generici: *a*) sistema di coordinate cartesiane; *b*) sistema generico di coordinate; *c*) sistema di coordinate polari.

Ad esempio, è ben noto a chi conosce un poco di geometria euclidea che in coordinate polari nel piano

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\vartheta^2.$$

Si può riconoscere che $x_1 = r$, $x_2 = \vartheta$, $g_{11} = 1$, $g_{12} = g_{21} = 0$, $g_{22} = r^2$. Supponiamo ora di avere non piú un piano, ma una porzione della superficie di una sfera di raggio R. Qui le coordinate ragionevoli sono, come si è detto, la latitudine λ e la longitudine φ, e la distanza fra due punti *infinitamente vicini* va scritta:

$$ds^2 = R^2(d\lambda^2 + \cos^2\lambda\, d\varphi^2).$$

Noi sappiamo che una porzione di piano ed una porzione di superficie sferica hanno qualche caratteristica sostanzialmente differente: ad esempio, non si può sviluppare la sfera su un piano senza deformarla o tagliarla. Il problema è se dalla forma di ds^2, o equivalentemente, di $g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$, si può dedurre, ad esempio, se la superficie su cui vale la metrica in questione è sviluppabile su un piano oppure no. La scoperta di Gauss – scoperta di cui quest'uomo schivo ed alquanto egocentrico nei suoi rapporti con la matematica fu particolarmente fiero (la chiamò «Theorema egregium») – fu che dalle g si può ricavare una quantità caratteristica della superficie e che non dipende dal sistema di coordinate usato, cioè la «curvatura gaussiana», K. Solo se essa è nulla, la superficie è sviluppabile su un piano. Nell'opera di Riemann compare un'altra grandezza, che generalizza la curvatura gaussiana ad un numero qualsiasi di dimensioni. Questo oggetto non è piú un unico numero, come nel caso delle superfici bidimensionali. Si tratta invece di una collezione di n^4 numeri, dove n è il numero di dimen-

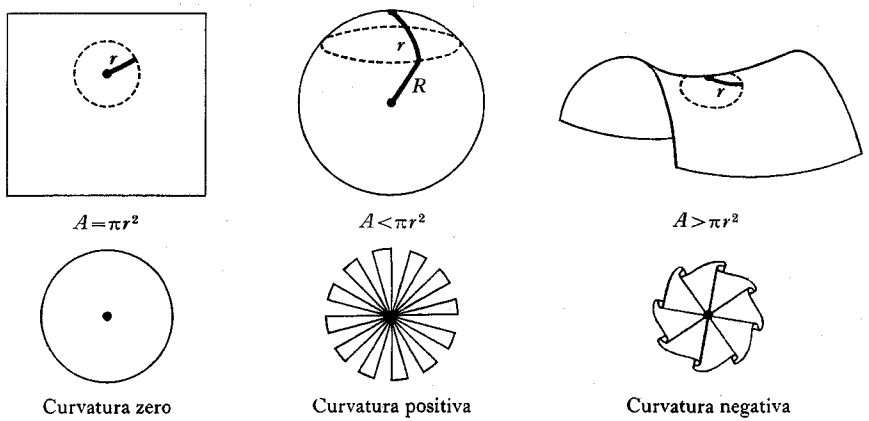


Figura 6.

In alto, circonferenza su un piano, una superficie sferica, una superficie a sella. In basso, che cosa succede delle porzioni di superficie racchiuse dalla circonferenza se si cerca di svilupparle su di un piano. (Da M. Berry, *Principles of Cosmology and Gravitation*, Cambridge University Press, New York 1976).

sioni dello spazio considerato. Tale collezione gode di opportune proprietà per cui può essere trattata come un tutto unico, e viene chiamata col nome di tensore, di Riemann per l'appunto. Come si manifesta una curvatura dello spazio? Per illustrare questo concetto ci serviremo di una analogia che risale a Helmholtz e che è stata usata in seguito da tutti i testi di divulgazione scientifica. Si consideri il caso di esseri bidimensionali (generalmente si tratta di «cimici» intelligentissime e curiose di geometria) che non hanno coscienza di una terza dimensione, ma vogliono scoprire se vivono su un piano o sulla superficie di una sfera. Un mezzo c'è, anzi piú di uno. Supponiamo che traccino un cerchio di raggio r: se si trovano su un piano, l'area del cerchio è, come è noto, πr^2. Se invece le nostre cimici si trovano sulla superficie di una sfera, le cose cambiano. Prima di tutto cos'è un cerchio sulla sfera? Questo non è difficile: si prenda come centro il «polo nord» (qualsiasi punto di una sfera può essere preso come «polo nord») e si misurino archi uguali su tutti i «meridiani». Si otterrà una linea che, in geografia, viene chiamata «parallelo». L'area delle calotte sferiche delimitate dai vari paralleli non è πr^2. Per esempio, se il raggio della sfera è R, notiamo che l'area della calotta delimitata dall'equatore è $2\pi R^2$ (metà dell'area della superficie sferica). Il «raggio» del cerchio equatore, misurato lungo i meridiani a partire dal polo, è $r = \pi R/2$. Quindi l'area non è πr^2, ma $8r^2/\pi$, cioè piú piccola di πr^2. E se si misura sui meridiani una lunghezza $r = \pi R$, cioè il cerchio si limita ad un punto (il «polo sud»), l'area è $4\pi R^2$, cioè $4r^2/\pi$. L'area dunque non è proporzionale ad r^2: essa cresce piú lentamente del quadrato del raggio. Se le «cimici» vivessero su una sella, scoprirebbero invece che l'area cresce piú rapidamente del quadrato del raggio. Si noti che le deviazioni dalla legge $A = \pi r^2$ sono tanto piú sensibili quanto piú grande è r. Anche uno spazio curvo tridimensionale manifesta la sua curvatura in un modo simile: si tratta di definire una superficie sferica, e di misurare il volume racchiuso da essa. Si potranno considerare situazioni in cui il volume cresce come $4\pi r^3/3$ (geometrie euclidee o a curvatura zero), in cui il volume cresce piú lentamente (geometrie a curvatura positiva) o piú rapidamente (geometrie a curvatura negativa) (cfr. fig. 6). Si tratterà di studiare degli esperimenti che permettano di decidere fra queste alternative. Fin qui Riemann: il suo contributo di fondatore della geometria differenziale, e riorganizzatore della geometria classica, non era tuttavia sufficiente a creare una cosmologia. In certo senso mancava una motivazione per introdurre una quarta dimensione, e mancavano le tecniche per condurre un esperimento che permettesse di dedurre la curvatura della porzione di spazio in cui viviamo, ed eventualmente l'analogo del raggio R della superficie sferica da noi considerata, una entità che potremmo chiamare il «raggio dell'universo».

4.2. La rivoluzione relativistica.

La motivazione per l'introduzione di una quarta dimensione è frutto del lavoro di Lorentz, Poincaré e soprattutto Einstein, nonché di esperimenti, tra cui quello di Michelson e Morley del 1887. Tutto questo lavorio teorico e spe-

rimentale si svolse, grosso modo, nel cinquantennio successivo a quello culminato con la sintesi riemanniana.

È dunque noto che la meccanica classica ammetteva un principio detto di relatività galileiana. Già Galileo, nel suo *Dialogo dei Massimi Sistemi*, aveva osservato che è impossibile decidere se si è su di un veicolo (nel suo esempio specifico una nave) fermo, oppure in moto rettilineo uniforme.

Il comportamento dei passeggeri su un grande transatlantico con mare calmo non richiede correzioni rispetto al comportamento su terraferma, almeno dal punto di vista puramente meccanico. Se il mare è agitato, invece, bisogna ricorrere a tutta una serie di aggiustamenti. È chiaro che il «guardar fuori» dalla nave permette, sulla base di qualche ragionamento plausibile, di concludere se essa è in moto o è ferma. Ma, nel caso in cui il «guardar fuori» non è permesso, questa conclusione è impossibile. Dunque la meccanica classica, che per lungo tempo dominò la fisica, ammetteva un principio di relatività. Tuttavia durante il secolo XIX un ramo della fisica, reso possibile dal progresso tecnologico, incominciò ad avere vita propria. Si tratta dell'elettromagnetismo, sviluppato dalle concezioni di Faraday, e sistemato in veste matematica da Maxwell. Le equazioni di Maxwell (1862) non spiegano solo i fenomeni noti a quel tempo, ma contengono si può dire tutto l'elettromagnetismo classico, anche il fenomeno delle onde elettromagnetiche, che dovevano essere rivelate in seguito, e sfruttate circa cinquant'anni dopo. Questo successo prodigioso poneva le equazioni di Maxwell su un piano privilegiato: si venne alla conclusione che difficilmente esse potevano essere sbagliate. Ma perché doveva sorgere il sospetto che fossero sbagliate? Ora, è un fatto forse inatteso per il lettore che da una ispezione delle equazioni fondamentali di un dato campo della fisica si possa dedurre se, ad esempio, esse ammettono il principio della relatività galileiana, o, per dirla in linguaggio piú sofisticato, se sono invarianti rispetto a trasformazioni di coordinate galileiane, o, piú grossolanamente, se è possibile stabilire se si è in quiete o in moto rettilineo uniforme per mezzo di esperimenti che su questo campo della fisica si basano. È chiaro che se non si può stabilire se siamo in stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, le equazioni della meccanica non possono dipendere dalla velocità di traslazione; esse non mutano, cioè sono invarianti, sia che scegliamo un sistema di riferimento fisso rispetto al mare, sia che lo scegliamo fisso rispetto alla nave.

L'espressione matematica di questa proprietà è che le equazioni della meccanica mantengono la stessa forma se si sottopongono le coordinate ed il tempo (x, y, z, t) ad una «trasformazione galileiana», cioè si definiscono nuove coordinate (x', y', z', t') misurate in un sistema di riferimento in moto rettilineo uniforme rispetto a quello di partenza. Scegliendo per comodità l'asse x lungo la direzione della velocità relativa v, le nuove coordinate saranno

$$\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t. \end{aligned}$$

Una breve riflessione convincerà il lettore della plausibilità di questa trasformazione (cfr. fig. 7).

La sorpresa in tutto questo era che una analisi delle equazioni di Maxwell rivelava che queste equazioni non sono invarianti rispetto ad una trasformazione galileiana. Dunque, doveva essere possibile stabilire per mezzo di esperimenti coinvolgenti le onde elettromagnetiche, ed in particolare la luce, se l'osservatore è in moto rettilineo e uniforme, oppure se è immobile rispetto a qualche sistema di riferimento universale da definirsi in seguito. Questa è la motivazione dell'esperimento di Michelson e Morley, che cercarono di stabilire la velocità della Terra rispetto a questo riferimento privilegiato. La velocità della Terra non è piccola, ed è nota (circa 30 km/sec). Michelson e Morley, tuttavia, non riuscirono a scoprire alcun effetto sulla propagazione della luce, dovuto al moto della Terra. La prima ipotesi per spiegare questa stranezza fu che per un caso fortuito la Terra in quella circostanza era a riposo rispetto al riferimento universale (l'etere). L'esperienza, però, ripetuta dopo sei mesi, diede ancora un effetto nullo. Eppure ora la Terra, percorrendo la sua orbita, doveva muoversi

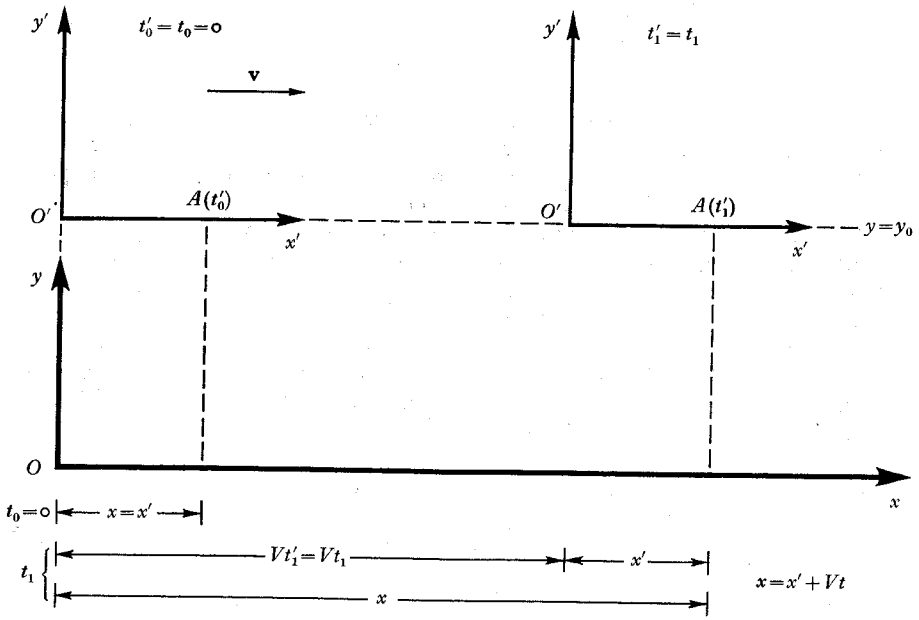


Figura 7.

Trasformazioni galileiane. Un sistema fisso (O) ed un altro (O') in moto rispetto al primo con velocità **v** e lungo l'asse $y = y_0$. In O' il punto A è fermo e la sua ascissa è x' in qualunque istante fra t'_0 e t'_1. Visto da O invece il punto A è in moto con la stessa velocità di O' ed ha una ascissa dipendente dal tempo $x(t)$. Conoscendo x' si può ottenere x notando che $x = x' + Vt$.

nella direzione opposta, a circa 60 km/sec rispetto all'etere. La proposta piú ragionevole (e non fu certo l'unica) era che nemmeno con mezzi elettromagnetici fosse possibile dedurre se l'osservatore era in moto uniforme oppure in quiete. Una analisi delle equazioni di Maxwell aveva rivelato che esse sono invarianti rispetto a una differente trasformazione di coordinate, che, diversamente dalle trasformazioni galileiane, coinvolge il tempo, ma in sostanza permette di concludere che non è possibile distinguere tra quiete e moto rettilineo uniforme per mezzo dell'elettromagnetismo. A questo scopo era necessario assumere che la velocità della luce, chiamata convenzionalmente c, è la stessa in tutti i sistemi di riferimento in quiete o in moto rettilineo uniforme. Queste nuove trasformazioni di coordinate (dette di Lorentz) possono essere dedotte senza fare uso di conoscenze matematiche avanzate (in sostanza non occorre piú delle quattro operazioni e delle radici quadrate). Tuttavia non è il caso dedurle in questa sede, e se ne riporta soltanto la forma a scopo di riferimento nella situazione analoga a quella per cui si sono ottenute le trasformazioni galileiane:

$$\begin{aligned} x' &= (x-vt)/(1-v^2/c^2)^{1/2} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= (t-vx/c^2)/(1-v^2/c^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

La plausibilità di queste equazioni non è cosí evidente come per il caso delle trasformazioni galileiane. Eppure oggi si considerano queste trasformazioni come corrette e quelle galileiane come vere solo in prima approssimazione. La trasformazione di coordinate di Lorentz presenta un altro vantaggio: per velocità piccole rispetto a c, si riduce alla trasformazione galileiana.

La meccanica classica veniva cosí spodestata, in quanto ridotta a un caso limite, per piccole velocità, di una non ancora formulata meccanica relativistica. Compito di Einstein, e di altri, fu la riformulazione in chiave relativistica di tutta la fisica classica. Alcuni concetti ritenuti intoccabili passarono in secondo piano, altri vennero valorizzati. Senza riassumere qui la profonda rivoluzione operata dalla relatività nella fisica classica, ricorderemo soltanto una conseguenza notevole: in meccanica il concetto di forza (predominante dai tempi di Newton, ma già severamente criticato da Hertz) passò al ruolo di grandezza sussidiaria, mentre l'equivalenza massa-energia ($E=mc^2$) doveva regalare al genere umano emozioni intellettuali dapprima, e poi di tutt'altro tipo.

Il punto fondamentale di questo discorso è che il tempo veniva ridotto al rango delle altre tre coordinate spaziali, mentre nelle trasformazioni galileiane, e in tutta la fisica di Newton, rimaneva indipendente dalle modificazioni che coinvolgevano le altre coordinate. Non si poteva piú sfuggire allora alla conclusione che l'universo è quadridimensionale, sebbene la quarta coordinata abbia caratteristiche differenti dalle altre. Di conseguenza presentava interesse lo studio della struttura dello spazio a quattro coordinate, detto spazio-tempo, risultante da questa fusione: in particolare diveniva interessante l'investigazione della curvatura e delle altre eventuali proprietà intrinseche di questo spazio.

4.3. I fondamenti della relatività generale.

In base a queste premesse possiamo affermare che, per quanto ci concerne, l'universo in cui viviamo, o spazio-tempo, può essere definito come un ente, rigorosamente «varietà», quadridimensionale. I singoli «punti» di questa varietà rappresentano degli «eventi», cioè degli avvenimenti in un certo punto dello spazio e a un certo istante di tempo.

Per distinguere gli eventi l'uno dall'altro, come nel caso della superficie sferica, che è (una «varietà») bidimensionale, diversi sistemi di coordinate possono essere utilizzati e, come ci si può aspettare, occorreranno quattro numeri per identificare un evento. Questi quattro numeri, come la latitudine e la longitudine sulla superficie terrestre, non permettono necessariamente di misurare direttamente delle distanze, a meno di fornire in qualche modo l'informazione mancante. Infine, possono esistere singolarità dovute o meno al sistema di coordinate usato.

Un punto interessante è che lo spazio-tempo è empiricamente continuo. Di nuovo, senza dare una definizione matematica di 'continuo', possiamo dire che non esistono eventi o gruppi di eventi isolati. Si possono eventualmente fare esperimenti allo scopo di vedere su quale scala le predizioni basate sulla continuità dello spazio-tempo sono rispettate, e finora non si sono avute discrepanze neppure a livello subnucleare, 10^{-16} cm. (Il diametro di un nucleo è 10^{-13}-10^{-12} cm). Non è detto che questo sia vero su scale di distanze minori. Ci si aspetta, per esempio, che accada qualcosa quando si considerino dimensioni dell'ordine della «scala di lunghezze di Planck», $1{,}616 \cdot 10^{-33}$ cm. Il lettore si può chiedere come si arrivi al valore 10^{-33}. Si considerano le costanti universali, note, $\hbar$ (costante di Dirac), G (costante gravitazionale), c (velocità della luce). La prima è una energia moltiplicata un tempo, la seconda una forza per una lunghezza al quadrato diviso una massa al quadrato, la terza una velocità. Con queste quantità si può costruire una sola grandezza misurabile in centimetri, cioè una lunghezza. Il problema può essere risolto facilmente servendosi dei metodi dell'analisi dimensionale, col risultato: $L_P = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1{,}616 \cdot 10^{-33}$ cm. Su questa scala lo spazio-tempo potrebbe allora avere una struttura «schiumosa», e forse si dovrebbe mettere in discussione il concetto stesso di dimensionalità.

L'analogia bidimensionale è stata ulteriormente elaborata da Misner, Thorne e Wheeler nell'introduzione a un testo che vuole essere una specie di summa della teoria e delle applicazioni della relatività generale. Qui si considerano delle formiche (questa volta normali) che si muovono su una mela. Si tagli una striscia di buccia che segua la traccia di una formica. Se la formica, ragionevolmente, si muove in modo da percorrere la minima distanza fra due punti, si trova che, svolgendo la striscia su un piano, essa è una retta. Su un piano la linea che gode della proprietà di minimizzare la distanza fra due punti è notoriamente la retta. Su una mela invece non possiamo tracciare delle rette, se non su piccolissime porzioni, che possiamo considerare quasi piane.

Esistono però delle linee che minimizzano la distanza fra due punti (come

il cammino della formica). Esse sono dette geodetiche e godono di certe proprietà comuni alla retta: su piccole regioni sono indistinguibili da questa, mentre su grande scala sono completamente diverse. È noto che sulla sfera terrestre un aereo che voglia andare da un punto all'altro percorrendo la distanza minore deve percorrere un arco di cerchio massimo. Di qui il risultato a prima vista inatteso che per andare da Napoli a New York secondo la rotta piú breve non bisogna seguire il parallelo su cui si trovano Napoli e New York. Infatti il solo parallelo che è anche cerchio massimo è l'equatore. Si può spingere l'analogia piú avanti: osserviamo il percorso di una formica vicino al picciolo, dove le mele presentano in generale un avvallamento. Nell'ansia della formica di percorrere distanze minime, si vedrà (fig. 8) che il percorso si avvicina al picciolo, quasi ne fosse attratta. Eppure la formica si orienta non in base al picciolo, di cui probabilmente non si rende neppure conto, ma in base alla struttura locale della superficie della mela. Si consideri ora il moto dei pianeti. Se diciamo che la Terra è attratta dal Sole (punto di vista di Newton), in un certo senso aderiamo all'interpretazione secondo cui la formica è attratta dal picciolo. Se invece diciamo che la presenza del Sole distorce, o curva, lo spazio (quadridimensionale!) nelle sue vicinanze, e che la Terra semplicemente segue una geodetica, cioè minimizza la distanza percorsa in base alla struttura locale dello spazio-tempo (punto di vista di Einstein), aderiamo alla seconda interpretazione. Riassumendo dunque l'analogia, ricaviamo due concetti:

1) Lo spazio prescrive alla materia come muovere. La struttura della superficie dice alla formica in che direzione andare, similmente la curvatura dello spazio prescrive alla Terra la sua orbita, perché sia pianeti sia formiche hanno un unico scopo: risparmiare strada; e quindi percorrono delle geodetiche.
2) La materia deforma lo spazio. L'avvallamento è dovuto al picciolo, in altri termini lo spazio intorno al Sole è deformato dalla presenza del Sole. Possiamo chiedere: quale caratteristica del Sole deforma lo spazio circostante? La temperatura? La luminosità? La forma? La risposta è che il contributo principale è dato dalla massa. Possiamo dire di piú: lo spazio non è soltanto deformato dalla massa, ma anche da tutto ciò che è equivalente alla massa, in particolare l'energia, grazie all'equazione già ricordata, $E = mc^2$.

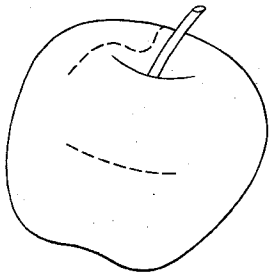


Figura 8.
L'analogia bidimensionale elaborata da Misner, Thorne e Wheeler. Sulla mela sono mostrati due percorsi della formica. Si noti la distorsione nel percorso che passa vicino al picciolo.

Queste due conclusioni, che abbiamo raggiunto per mezzo di una analogia, costituiscono i fondamenti della relatività generale. Vista la loro importanza, vorremmo illustrarli in modo un po' piú dettagliato, che, inevitabilmente, richiederà una dose maggiore di formalismo matematico, di cui non potremo dare completamente ragione.

Storicamente si arrivò ai due concetti enunciati piú sopra attraverso due principî: il principio di relatività generale e il principio di equivalenza.

La relatività ristretta considera quasi esclusivamente sistemi di riferimento inerziali. Definire un sistema inerziale è abbastanza immediato. Intanto per sistema di riferimento s'intende un reticolo tridimensionale che permetta di definire le coordinate spaziali di un evento. Ad ogni punto del reticolo dobbiamo immaginare associato un orologio e naturalmente tutti gli orologi debbono essere sincronizzati nell'ambito di uno stesso sistema; ciò è in generale piú facile a dirsi che a farsi, o, addirittura, ad idearsi. Sistema inerziale significa che in tale sistema una particella non soggetta a forze esterne si muove di moto rettilineo e uniforme (cioè a velocità costante). Ne deriva che i sistemi inerziali, se esistono, si muovono di moto rettilineo uniforme gli uni rispetto agli altri.

Il principio di relatività generale è la conseguenza quasi inevitabile del principio di relatività ristretta, il quale afferma che le leggi della fisica possono essere enunciate in modo da assumere la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Da ciò segue che nessuno di questi sistemi si distingue dagli altri per un diverso comportamento della materia. Questi sistemi sono dunque perfettamente equivalenti. La logica estensione di questo principio è allora che le leggi della fisica devono poter essere enunciate in modo da essere valide in sistemi di riferimento che si muovono di moto qualsiasi e non solo di moto rettilineo uniforme. Ma, si farà osservare, nei sistemi di riferimento inerziali i corpi non soggetti a forze si muovono di moto rettilineo uniforme, e questo non può essere vero in un sistema di riferimento, per esempio, ruotante come una giostra. Qui infatti sappiamo che si manifesta la cosiddetta forza centrifuga, che non è una forza, ma esprime soltanto il «desiderio» di un corpo di muoversi di moto rettilineo uniforme. In una giostra, un corpo lasciato a se stesso descriverà un arco di spirale. La risposta a questa obiezione è che allora non dovremo insistere a richiedere che in tutti i sistemi in moto qualsiasi i corpi liberi descrivano rette nello spazio, a velocità costante, ma bisognerà accontentarsi di richiedere che descrivano delle geodetiche nello spazio-tempo. Sfortunatamente questo significa che lo spazio-tempo non potrà piú avere una geometria euclidea, perché, appunto, qui le geodetiche sarebbero delle rette. Il principio di relatività generale, dunque, costringe a introdurre una geometria non-euclidea: costringe, cioè, ad avvalersi dei risultati di quella che abbiamo chiamato la «rivo-

luzione geometrica». Come ci si orienterà nel guazzabuglio dei sistemi in moto qualsiasi? Qui interverrà il principio di equivalenza.

Si osservi la superficie di una sfera, per esempio la Terra. Un tratto di geodetica lungo, diciamo, cento metri, pur essendo un arco di cerchio (massimo) non è praticamente distinguibile da un segmento di retta euclidea. In altre parole, su una piccola porzione della superficie sferica, vale (non a caso) la geometria a cui siamo avvezzi. Per quanto riguarda lo spazio-tempo, ci aspettiamo che, in piccole regioni, si possano costruire dei sistemi localmente inerziali, in cui vale la relatività ristretta, che è la controparte della geometria euclidea. Infatti, come si può costruire un sistema inerziale? Esistono dei sistemi inerziali? Praticamente nessun sistema noto è rigorosamente inerziale. Si può parlare al piú di sistemi inerziali solo entro un certo grado di approssimazione, poiché essi dovrebbero essere infinitamente lontani da sorgenti di forze. È un fatto notevole che le forze differenti classificate dai fisici sono assai poche. Esistono infatti forze nucleari (interazioni forti e deboli), forze elettromagnetiche, e forze gravitazionali. Le prime sono a corto raggio (cioè sono efficaci solo a brevissime distanze, circa 10^{-13} cm e meno); le altre due sono a lungo raggio, cioè in linea di principio possono essere efficaci a distanze grandissime, e si riducono a zero solo a distanza infinita. La materia su grande scala è elettricamente neutra, sebbene non manchino ipotesi che assegnano un piccolissimo eccesso di carica alla materia (nel modello di Lyttleton e Bondi, la minuta non-neutralità della materia provoca una repulsione elettrostatica, ed è calcolata in modo da spiegare l'espansione dell'universo. Per quanto a prima vista seducente, il modello è ora abbandonato. Infatti questo modello richiederebbe almeno un eccesso di carica di circa una parte su 10^{18} a favore del protone, mentre l'evidenza sperimentale è che l'eccesso di carica positiva, se c'è, è minore di una parte su 10^{20}). Dunque l'unica forza che può impedire di costruire sistemi di riferimento inerziali è la gravitazione universale, poiché non esistono, per quanto ne sappiamo, masse di segno negativo (non si confondano con l'antimateria) e quindi non esistono schermi statici alla gravità. Tuttavia la gravitazione universale possiede un aspetto notevole: sulla Terra tutti i corpi cadono nel vuoto con la stessa accelerazione. Gli oggetti perdono per cosí dire la loro individualità. Un libro, una piuma, un mattone seguirebbero la stessa traiettoria se non fosse per la differente resistenza dell'aria. Nello spazio vuoto la loro caduta verso lontani corpi celesti seguirebbe traiettorie rigorosamente identiche. Ecco dunque la possibilità di costruire un sistema che è apparentemente inerziale, almeno da un punto di vista meccanico: si costruisca un laboratorio e lo si lasci in caduta libera (è il famoso «ascensore di Einstein»). Si potrà allora sperimentare che particelle non soggette a forze si muovono di moto rettilineo uniforme, entro questo sistema. Un osservatore all'interno non potrà stabilire per mezzo di esperimenti di meccanica (e senza informazioni dall'esterno) se si trova in quiete, in moto rettilineo uniforme, o in caduta libera. Si pone di nuovo il problema se potrà stabilirlo per mezzo di esperimenti elettromagnetici. Un raggio di luce che in un laboratorio in quiete colpirebbe un certo bersaglio, finirà piú alto in caso di caduta libera? Come il lettore può immaginare la risposta (di Einstein) è no. In altre parole, non

si può stabilire per mezzo di alcun tipo di esperimento se ci si trova in quiete, in moto rettilineo uniforme, o in caduta libera. E questo è un aspetto del principio di relatività generale.

Ma c'è di piú: supponiamo di avere adesso due ascensori di Einstein. L'uno sia posato, per esempio, sulla superficie terreste. Tutto vi si svolge come sappiamo. Un corpo lasciato a se stesso cade con l'accelerazione g, 9,8 metri al secondo per secondo. Un altro ascensore einsteiniano sia invece lontano da ogni sorgente di forze, ma sia trascinato in una direzione arbitraria con una accelerazione pure di 9,8 metri al secondo per secondo. Gli oggetti che vi si trovano, per inerzia, saranno spinti verso la parete opposta alla direzione del moto, un corpo lasciato a se stesso «cadrà» verso questa parete con l'accelerazione di 9,8 metri al secondo per secondo; tutto, insomma, si svolgerà esattamente come nel caso precedente.

Potrà un osservatore decidere se si trova fermo in un campo gravitazionale, oppure in un sistema in moto accelerato? Di nuovo, la risposta è no. Questi due sistemi di riferimento sono equivalenti (principio di equivalenza). Trattandosi di un principio non può essere dimostrato. Se ne possono solo cercare conferme sperimentali dirette o indirette, e finora non sembra ci siano eccezioni. Un buon motivo per riconsiderare questo principio si avrebbe se l'antimateria dimostrasse di avere una massa di segno opposto a quello della materia, per esempio «cadendo all'insú» nel campo gravitazionale terrestre.

Il principio di equivalenza deve tuttavia avere una base sperimentale. Si consideri la legge di Newton per la caduta di un corpo di massa m sulla Terra (la cui massa è M). Come è noto, la legge può essere scritta:

$$ma = G\,\frac{Mm}{R^2}.$$

Ma la massa m che compare sul lato sinistro rappresenta la massa inerziale, mentre quella che compare sul lato destro con lo stesso simbolo è la massa gravitazionale, e si tratta a priori di due cose diverse. Se però le due masse fossero uguali, potremmo scrivere:

$$a = \frac{GM}{R^2}.$$

In questo caso (massa inerziale uguale alla massa gravitazionale) e solo in questo caso, possiamo dire che l'accelerazione di gravità è indipendente dalla massa del corpo che cade perché m scompare dall'equazione. Ma che questo avvenga è proprio quello che si richiede perché si possa parlare di principio di equivalenza. Se cosí non fosse si potrebbero distinguere sistemi uniformemente accelerati da sistemi sottoposti a un campo gravitazionale uniforme: nel primo caso tutte le masse avrebbero la stessa accelerazione, nel secondo no. Allo stesso modo, dalle relative accelerazioni di corpi di massa diversa si potrebbero distinguere campi gravitazionali di diversa intensità. Il principio di equivalenza richiede dunque che la massa gravitazionale sia uguale alla massa inerziale, o almeno proporzionale ad essa. È sufficiente richiedere la proporzionalità, perché se ne può di-

sporre per mezzo di una opportuna scelta delle unità di misura. Si tratta ora di compiere esperimenti che permettano di verificare questa proporzionalità: il piú noto, che fa essenzialmente uso di una bilancia di torsione, ed è stato progressivamente perfezionato a partire dai primi e già notevoli tentativi di Eötvös (1889), assicura che corpi di diversa composizione sentono un'accelerazione gravitazionale che differisce per meno di una parte su 10^{12} (un trilione) dall'uno all'altro, uno dei risultati sperimentali piú precisi che si conoscano.

A questo punto la gravitazione sembra scomparsa: ovunque la geometria dello spazio-tempo è localmente definita dalla relatività ristretta; particelle libere cercano di minimizzare l'«intervallo» Δs da esse percorso, e descrivono quindi delle geodetiche.

Ma dunque, è possibile che la gravitazione scompaia del tutto? E in caso contrario come si manifesta? Perché, occorrerà pure che si manifesti in qualche modo, per permettere la scelta di una geometria dello spazio-tempo. Possiamo prevedere che la sua manifestazione sarà connessa con la curvatura. Facciamo un semplice esempio: si pensi a un buco che attraversi la Terra passando per il centro. Lasciamo cadere nello stesso istante due palline pesanti dai due estremi opposti del buco. Un po' di studio, basato su argomenti del tutto classici, convincerà che, per assi coordinati cartesiani disposti comunque, la separazione $\boldsymbol{\xi}(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$ delle due particelle segue la legge:

$$d^2\boldsymbol{\xi}/dt^2 = -\left(\frac{4}{3}\pi G\rho\right)\boldsymbol{\xi},$$

che, ponendo $\tau = ct$, diviene

$$d^2\boldsymbol{\xi}/d\tau^2 = -\left(\frac{4}{3}\pi\frac{G\rho}{c^2}\right)\boldsymbol{\xi}.$$

(Si tratta dell'equazione di un moto armonico con un periodo di 84 minuti).

Ora, come sappiamo, le due palline pesanti in caduta libera percorrono delle geodetiche nello spazio-tempo, e l'equazione appena scritta è l'equazione della deviazione geodetica, che governa la separazione fra due geodetiche vicine in funzione del parametro τ.

Da un punto di vista puramente geometrico, si può far vedere che l'equazione rilevante per uno spazio a quattro dimensioni dovrebbe essere scritta come:

$$d^2\boldsymbol{\xi}/d\tau^2 + \mathrm{Riemann}(\mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{u}) = 0$$

(legge della deviazione geodetica).

La separazione delle geodetiche è espressa in generale da una collezione di quattro grandezze $(\xi^1, \xi^2, \xi^3, \xi^4)$ che si comportano in modo caratteristico; e sono dette vettore $\boldsymbol{\xi}$ (in quattro dimensioni).

Riemann è, appunto, il tensore di Riemann, il quale, come si è detto, generalizza la curvatura gaussiana di una superficie, e $\mathbf{u}$ è un altro vettore in quattro componenti che rappresenta punto per punto la tangente alla geodetica, il cui elemento d'arco è $d\tau$. Se si paragona quest'equazione con quella ottenuta piú sopra, si vede che in qualche modo il tensore di Riemann compie l'ufficio della forza. Nel caso in esame delle due palline esso è particolarmente semplice:

$$\begin{Vmatrix} R^1_{010} & R^2_{010} & R^3_{010} \\ R^1_{020} & R^2_{020} & R^3_{020} \\ R^1_{030} & R^2_{030} & R^3_{030} \end{Vmatrix} = \frac{4\pi G\rho}{3c^2} \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}.$$

È un caso che le equazioni della deviazione geodetica possano qui essere ridotte da quattro a tre dimensioni: ciò è dovuto al fatto che in questo problema tutte le altre componenti del tensore di Riemann sono trascurabili rispetto a quelle elencate. La materia (che ha densità ρ) è dunque responsabile della deviazione geodetica, o della curvatura dello spazio, poiché essa entra in modo diretto nell'espressione matematica del tensore di Riemann. Dunque la materia ha un effetto diretto sulla geometria. Ma già abbiamo ricordato la fondamentale legge di Einstein $E = mc^2$: all'energia in qualsiasi forma si può attribuire una massa, e quindi qualsiasi forma di energia entrerà nella costituzione del tensore di Riemann. Da un lato il tensore di Riemann è dunque legato ad ogni forma di energia presente; dall'altro esso è legato alla piú notevole proprietà intrinseca dello spazio, la curvatura.

Supponiamo ora che un'onda gravitazionale, per esempio prodotta dall'esplosione di una supernova, raggiunga la Terra. Un'onda gravitazionale si manifesta come un «corrugamento» nella curvatura dello spazio-tempo, che si propaga alla velocità della luce. In questo caso la curvatura, cioè il lato sinistro dell'equazione, cambierà secondo questo corrugamento, mentre il lato destro, che dipende solo dalla densità di materia, rimarrà invariato. Dobbiamo allora dire che l'equazione non è piú valida? In realtà Einstein scoprí che in ogni caso c'è un altro tensore (G, tensore di Einstein) che rimane indisturbato da perturbazioni del tipo delle onde gravitazionali, e che si può costruire a partire dal tensore di Riemann, rappresentandone quasi la media sulle varie direzioni. Nel nostro caso esso è dato semplicemente dalla somma delle componenti diagonali:

$$R_{00} = R^1_{010} + R^2_{020} + R^3_{030} = 4\pi\rho\frac{G}{c^2}.$$

D'altra parte la distribuzione di materia ed energia è riassunta dal tensore di energia-impulso (T) e quindi la scoperta di Einstein può esser riassunta con l'affermazione che deve valere la legge:

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\alpha\beta} \qquad (\alpha, \beta = 1, 2, 3, 4).$$

Si tratta di sedici equazioni, le equazioni di Einstein, che reggono la relatività generale. Solo dieci di queste equazioni sono distinte e definiscono in qual modo il tensore energia-impulso T genera una curvatura media (il tensore G). A sua volta il tensore G è costruito a partire dalle g_{ik} (cfr. § 4.1) che determinano la struttura dello spazio-tempo e possono cosí essere dedotte da T. Queste equazioni regolano l'esistenza e la propagazione di onde gravitazionali (perturbazio-

ni della curvatura dello spazio-tempo); governano la propagazione della luce e la traiettoria delle particelle in un campo gravitazionale; predicono il collasso delle stelle fino alla formazione dei buchi neri; governano, infine, l'evoluzione dell'universo.

4.4. Modelli cosmologici.

Modelli pseudonewtoniani. Come si è indicato, il compito della relatività generale è vastissimo. Diremo di piú: in sostanza essa si propone di riformulare l'intera fisica classica in modo indipendente dal sistema di riferimento. Noi non la seguiremo su questa via, accontentandoci di averne indicato il programma e, sia pure in modo inadeguato, le basi. Cosí citeremo soltanto le classiche conferme sperimentali (non ancora definitive, però), quali la deflessione delle onde elettromagnetiche in un campo gravitazionale, l'interpretazione dello spostamento del perielio di Mercurio, e l'esistenza di un *redshift* gravitazionale. Ma, ciò che piú ci preme, possiamo ora affrontare l'analisi dei modelli cosmologici, i quali si propongono di descrivere la struttura e l'evoluzione dell'universo. Qui abbiamo due sorprese in serbo: da un lato è possibile inquadrare nello schema della relatività generale anche modelli che storicamente e filosoficamente ne sono indipendenti. In secondo luogo una descrizione affine, ma piú intuitiva, dei modelli cosmologici può essere ottenuta basandoci sulla piú semplice meccanica newtoniana in uno spazio euclideo.

In un primo tempo si pensava che la legge di forma newtoniana, $F = -Gm_1m_2/r^2$, pur spiegando bene la dinamica dei corpi del sistema solare, non fosse adatta a trattare i fenomeni che avvengono su scala universale. Il problema che si presentava subito era che, in un universo infinito, la forza newtoniana agente su una massa unitaria posta in qualsiasi punto doveva essere infinita. Dal punto di vista matematico il problema è identico a quello che conduce al paradosso di Olbers. Si supponga infatti una massa unitaria posta nell'origine del sistema di riferimento (e questa origine può essere scelta a piacere, in un universo omogeneo). Ogni guscio di raggio r e spessore Δr contribuisce con una forza

$$F_{\text{guscio}} = -\frac{Gm_{\text{guscio}}}{r^2} = -G\,4\pi\rho\,\Delta r,$$

ove abbiamo sostituito $m_{\text{guscio}} = 4\pi r^2\rho\,\Delta r$, essendo ρ la densità di materia. Se quindi il raggio dell'universo è infinito, abbiamo:

$$F_{\text{totale}} = -4\pi G\rho R_{\text{universo}} = \text{infinito}.$$

Riesce dunque impossibile, con una forza di questo tipo, pensare di costruire una qualsiasi dinamica dell'universo, a meno di considerare l'universo come finito. È proprio questa via che sceglieranno nel 1934 Milne e McCrea, ma ciò era impensabile alla fine dell'Ottocento, quando la tendenza ufficiale era quella di attribuire dimensioni infinite all'universo. Se invece si esclude questa scappatoia, è necessario agire o sulla legge di forza stessa, o sulla densità di materia.

La prima possibilità fu presa in esame da Neumann e von Seeliger nel 1896, col suggerimento che l'attrazione gravitazionale dovesse essere corretta nel modo seguente (non sfuggirà al lettore esperto che si tratta della legge di forza derivante da un potenziale non molto diverso da $\varphi = -K\exp[-r/r_0]/r$, che doveva essere riproposto da Yukawa nel 1935 per spiegare le interazioni nucleari, e con ben altra fortuna):

$$F = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}\,e^{-r/r_0}.$$

L'effetto del termine e^{-r/r_0} è di ridurre notevolmente l'azione della forza soprattutto per distanze superiori a r_0. Le masse poste a distanza maggiore di r_0 eserciterebbero un'azione completamente trascurabile sulla massa posta all'origine, con il risultato che, anche per un universo infinito, si avrebbe

$$F_{\text{totale}} = -4\pi G\rho r_0.$$

Questo tipo di proposta, pur fornendo un modello statico dell'universo (altro requisito che appariva ovvio verso la fine del secolo scorso) non ebbe fortuna, e fu completamente dimenticato.

L'altra possibilità, di modificare la densità di materia, fu dapprima considerata da Charlier nel 1909, e ripresa piú tardi da Vaucouleurs nel 1970. In questo tipo di modello si osserva che la densità media della parte di spazio nota come sistema solare è equivalente a una decina di atomi d'idrogeno per centimetro cubo. Se però si calcola la densità media dell'intera Galassia, di cui il sistema solare fa parte, si trova che essa è piú bassa, cioè è di circa un atomo di idrogeno per centimetro cubo. Ma se si fa la media sull'ammasso di galassie di cui facciamo parte, l'ammasso della Vergine, si ha solo l'equivalente di un atomo di idrogeno ogni diecimila centimetri cubi, e se si fa una media su diversi ammassi vicini, si trova circa un atomo di idrogeno ogni milione di centimetri cubi.

A questo punto l'odierna cosmologia ufficiale si arresta, e considera come densità media dell'universo un valore che non si discosta molto da questo, variando un poco a seconda dei modelli. Charlier invece procede, nella sua costruzione di un universo gerarchico: qui ogni unità fa parte di una unità di ordine superiore, in cui la densità media è piú bassa. Poiché in questo modello non esiste un ordine massimo, la densità dell'universo, ρ, al limite, è zero. Da ciò segue che la forza gravitazionale che agisce in qualsiasi punto è anch'essa zero. Come tutti i ragionamenti di questo tipo, basati sostanzialmente su qualche processo di estrapolazione di dati sperimentali, si può giungere a conclusioni logicamente corrette, ma non verificabili, se non addirittura in contrasto con gli stessi risultati sperimentali. In ogni caso, l'osservazione dell'universo, per il momento, mentre sembra confermare il carattere di omogeneità ed isotropia che in genere le teorie cosmologiche moderne assumono come principio fondamentale (principio cosmologico), non offre alcuna prova sicura che esistano associazioni di ammassi di galassie (i «superammassi»), per tacere di altre unità gerarchiche di ordine superiore. Ricordiamo che decisivo, riguardo all'omo-

geneità, viene considerato il fatto che la radiazione di fondo a circa 3 °K appare isotropa, almeno entro i limiti sperimentali.

Procederemo ora, come annunziato, alla costruzione, relativamente semplice e intuitiva, di modelli cosmologici newtoniani, basandoci sugli argomenti di Milne e McCrea (1934). Queste considerazioni, sfortunatamente, non furono fatte prima della scoperta della relatività generale, né prima delle osservazioni di Hubble, delle quali l'una richiedeva e le altre confermavano sperimentalmente il fatto che l'universo in realtà sembra essere in evoluzione, e non statico. Fatte a posteriori, rimane loro il sapore di inattese conferme, che tuttavia aiutano nella difficile interpretazione delle grandezze che appaiono nelle non dissimili equazioni della relatività generale. Procedendo come di solito per analogia, consideriamo anzitutto un palloncino di gomma che viene gonfiato. La distanza fra due punti qualsiasi della sua superficie aumenta col crescere del suo raggio, mentre restano costanti i rapporti fra le varie distanze. Raddoppiando il raggio del palloncino tutte le distanze fra coppie di punti qualsiasi della sua superficie raddoppiano. In modo analogo dovremmo poter descrivere la situazione nel caso dell'universo, che qui considereremo come una nuvola di polvere omogenea, trascurando le condensazioni individuali di massa, che non dovrebbero importare su grande scala. Sia $\rho(t)$ la densità di materia, dipendente dal tempo. La legge secondo cui qualsiasi distanza varia in funzione del tempo può allora essere scritta come $r(t)=R(t)r_0$, dove r_0 è il valore della distanza in esame ad un tempo prefissato t_0, e quindi $R(t_0)=1$. $R(t)$ assume qui il significato di «scala delle lunghezze». Possiamo scegliere t_0 come l'epoca attuale, sebbene non sia questa l'unica scelta possibile. A questo punto, non senza qualche mancanza di rigore, possiamo scrivere la legge di forza. Per far questo, si consideri una particella di polvere, di massa unitaria, a distanza r dall'origine, che può esser scelta a piacere. Rispetto a un osservatore fisso nell'origine, la forza gravitazionale a cui la particella è sottoposta è dovuta unicamente alla massa M contenuta nella sfera di raggio r, massa che rimane costante con l'espansione, se non è creata materia: tutte le particelle di polvere partecipano infatti dell'espansione. La seconda legge di Newton afferma che

$$\frac{d^2r}{dt^2}=-\frac{GM}{r^2}.$$

Sostituendo $r(t)=R(t_0)r_0$, si ha:

$$r_0\frac{d^2R}{dt^2}=-\frac{GM}{R^2}\,\frac{1}{r_0^2}.$$

Ma $M=\frac{4}{3}\pi\rho_0 r_0^3$, costante, e quindi:

$$R^2\frac{d^2R}{dt^2}=-\frac{4}{3}\pi G\rho_0.$$

Sfortunatamente in testi diversi il parametro $R(t)$ assume significati diversi: per semplificare il compito del lettore volonteroso si può unificare formalmente

un certo numero di trattazioni scegliendo di analizzare il moto di una particella di massa unitaria posta a distanza $r_0=1$ dall'origine, e scrivendo quindi l'equazione del moto come

$$\frac{d^2R}{dt^2}=-\frac{GM}{R^2},$$

formalmente identica all'equazione a cui si può giungere considerando il moto di un punto sul contorno di una nuvola sferica di raggio R. Lo studio di questo sistema è piú intuitivo, R assume ora il significato di raggio ed M di massa totale dell'universo. Occorre però far notare che questa rappresentazione è estremamente grossolana, poiché essa appare subito violare il principio cosmologico: la descrizione dell'universo da parte di un osservatore alla periferia della nuvola è del tutto diversa da quella che darebbe un osservatore all'interno. Questa equazione dice subito che non si può avere un universo statico se il potenziale è quello gravitazionale: la nube non muterebbe, cioè $R(t)$ non subirebbe variazioni col tempo, solo se M fosse uguale a zero, e quindi non ci fosse massa (niente polvere, niente stelle, niente cosmologi). Se invece M è diversa da zero, abbiamo delle soluzioni non banali, il cui andamento può essere illlustrato con qualche manipolazione, del tutto standard, dell'equazione del moto, che diviene:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2-\frac{GM}{R}=E.$$

Il lettore che ha qualche conoscenza di meccanica riconoscerà subito l'equazione di conservazione dell'energia: il primo termine rappresenta l'energia cinetica e il secondo l'energia potenziale, entrambe per unità di massa; E sarà quindi l'energia totale, e a seconda del valore che essa assume si può calcolare l'andamento di R nel tempo, e quindi il modello di universo. Esaminiamo ora i vari risultati possibili:

a) $E=0$. In questo caso l'energia totale è nulla, cioè l'energia cinetica uguaglia esattamente l'energia potenziale. L'attrazione gravitazionale non riesce a frenare l'universo se esso si sta espandendo, e quindi l'universo si espande fino all'infinito con velocità decrescente. Risolvendo l'equazione, si ottiene infatti che $R(t)$ è proporzionale a $t^{2/3}$.

b) $E>0$. In questo caso l'energia cinetica predomina su quella potenziale. L'universo si espande indefinitamente, dapprima secondo la legge $t^{2/3}$, e poi a velocità costante, $R(t)$ diventando proporzionale a t.

c) $E<0$. In questo caso l'universo non può espandersi all'infinito in quanto l'energia di legame, potenziale, è superiore all'energia cinetica. Qui si può determinare qual è il raggio massimo consentito in queste condizioni, ponendo la velocità uguale a zero ($dR/dt=0$) nell'equazione della conservazione dell'energia. Infatti la velocità è zero quando l'espansione termina, e inizia la ricontrazione. Rimane cosí fissato il raggio massimo di espansione:

$$R_{\text{mass}}=\frac{GM}{|E|}.$$

Utilizzando unicamente la fisica newtoniana, è dunque possibile ottenere dei modelli di universo in cui si ha espansione illimitata, oppure espansione seguita da contrazione. Due cose bisogna notare: in primo luogo, come si è detto, rimane escluso un modello in cui le dimensioni dell'universo restano le stesse (modello statico); in secondo luogo all'istante iniziale ($t=0$) si ha in ogni caso $R=0$, cioè una «singolarità» (cfr. fig. 9).

Ma, se insistiamo nel volere un universo statico, occorre introdurre un termine in piú, di segno opposto, cioè repulsivo. Matematicamente piú semplice è il caso di una repulsione del tipo della forza centrifuga, senza volerci addentrare troppo nella spinosa questione di che cosa significhi una rotazione dell'universo. Questo termine deve essere trascurabile su distanze dell'ordine del sistema solare, ma deve essere importante su distanze dell'ordine del raggio dell'universo. Con questa modifica l'equazione del moto diviene:

$$\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{GM}{R^2}-\frac{1}{3}\Lambda R=0.$$

Il termine $1/3\Lambda$ appare in questa forma, non essenziale, per ottenere una identità formale con l'equazione corrispondente che, come vedremo, risulta dalla relatività generale. Dall'equazione scritta discende una serie di modelli cosmologici assai piú ricca che nel caso precedente. Intanto, per esempio, diviene possibile un modello statico: ponendo $d^2R/dt^2=0$ nell'equazione della forza, si ottiene un valore di R indipendente dal tempo, e diverso da zero, che può essere interpretato come il raggio dell'universo statico, o come scala statica di lunghezza, a seconda delle nostre stipulazioni iniziali.

Una descrizione dei numerosi modelli ottenibili non è essenziale, basta sottolineare che i vari modelli possono essere raggruppati in tre classi:

1) modelli statici, in cui non variano le dimensioni dell'universo;
2) modelli in cui un'espansione iniziata da una singolarità, o da un nucleo iniziale di dimensioni finite, si protrae indefinitamente nel tempo fino a raggiungere dimensioni finite od infinite;
3) modelli in cui a una prima fase di espansione a partire da una singolarità segue una fase di contrazione che si conclude con un'altra singolarità.

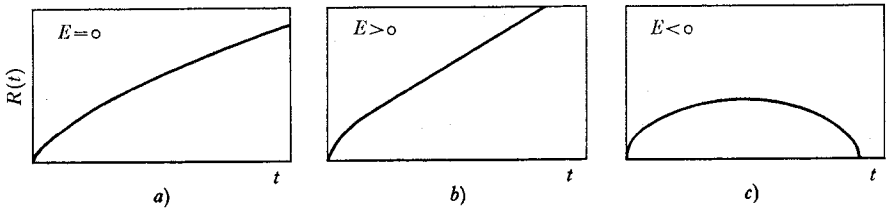


Figura 9.

L'andamento di $R(t)$ nei modelli di universo ottenibili utilizzando solo la fisica newtoniana.

Modelli relativistici. Come abbiamo già accennato, base di quasi tutti i modelli relativistici è il principio cosmologico, secondo cui l'universo è omogeneo ed isotropo, e nessuna galassia, nessuna direzione di osservazione possono esser considerate privilegiate. Questo principio, in sostanza, implica che osservatori in qualunque punto dell'universo ne darebbero una descrizione sostanzialmente uguale, almeno per quanto concerne le proprietà su grande scala: se si vuole, è questa la liberazione definitiva da qualunque residuo di illusione antropocentrica. Se poi l'omogeneità è estesa anche al tempo, abbiamo il principio cosmologico perfetto, estensione che implica in piú che l'aspetto dell'universo sia lo stesso in ogni epoca. Come è stato fatto osservare scherzosamente, questo sarebbe l'universo ideale per un burocrate: sempre la stessa regola in ogni luogo e in ogni occasione. Il principio cosmologico perfetto porta necessariamente a condizioni stazionarie (si badi bene, non statiche!) per l'universo in espansione. Un tubo in cui scorre un fluido incompressibile, a ritmo costante, può essere un esempio chiaro di una situazione stazionaria, ma non statica: si ha del moto, l'acqua che passa attraverso una sezione del tubo non è mai la stessa, ma le proprietà piú interessanti (ad esempio la densità e la velocità del fluido punto per punto) rimangono costanti nel tempo. Si vede però subito che occorre immettere continuamente materia nell'universo, per garantire che la densità si mantenga costante nonostante l'espansione. Ma la materia da immettere nell'universo non può essere presa da qualche serbatoio, bisogna per forza crearla, sia pure in piccolissima quantità. Ad esempio, per il valore attuale della costante di Hubble, che misura il ritmo di espansione, occorre creare un atomo di idrogeno per decimetro cubo ogni $5\cdot10^{12}$ (milioni di milioni di) anni.

Naturalmente, cosí facendo, la materia, e quindi l'energia, non sono conservate in questo tipo di modello. A rigor di logica, ciò è in contrasto col fatto che, alla luce delle moderne teorie fisiche, sembra che la conservazione dell'energia derivi proprio dalla omogeneità rispetto al tempo. A parte questa considerazione di carattere estetico, che dopo tutto non è insuperabile, lo scoglio principale per il modello dell'universo stazionario in esame rimane l'impossibilità di spiegare in modo convincente la radiazione di fondo a 3 °K, nonostante le piú recenti rielaborazioni dovute a Hoyle e Narlikar. È questo il motivo fondamentale per cui questa teoria, pur affascinante nella sua semplicità, è stata ormai abbandonata.

Torniamo ora al principio cosmologico, che, oltre a trovare conferme sperimentali, ad esempio nella distribuzione delle galassie, permette di costruire una metrica particolarmente semplice, e quindi particolarmente gradevole da un punto di vista teorico. Si può dimostrare infatti (ed è quanto fecero Robertson e Walker indipendentemente l'uno dall'altro nel 1935) che unicamente sulla base di questo principio la distanza fra due punti infinitamente vicini di uno spazio a quattro dimensioni può essere scritta come:

$$ds^2=c^2dt^2-R^2(t)\frac{dx^2+dy^2+dz^2}{(1+k r_0^2/4)^2},$$

dove $r_0^2 = x^2 + y^2 + z^2$: si ricordi che r_0 non cambia nel tempo, tutto il cambiamento è concentrato nel fattore $R(t)$, che è la già incontrata scala delle lunghezze. k è detto l'indice di curvatura, in quanto la quantità k/R^2 rappresenta la curvatura dello spazio in tre dimensioni. Se $k = 0$, allora lo spazio si dirà euclideo (curvatura nulla), e, come abbiamo già illustrato, la circonferenza e l'area del cerchio saranno le note espressioni $2\pi r$ e πr^2. Se $k = +1$, lo spazio si dirà invece ellittico, e la circonferenza e l'area del cerchio assumeranno valori minori che nel caso euclideo. Se infine $k = -1$, lo spazio si dirà iperbolico, e le due quantità saranno maggiori di quelle euclidee. Notiamo che lo spazio euclideo e quello iperbolico sono detti «aperti», mentre quello ellittico è detto «chiuso» (in quest'ultimo tutte le geodetiche sono linee chiuse). La grandezza interessante in questa metrica (vi si riconosceranno le grandezze g_{ij} che abbiamo introdotto a suo tempo) è $R(t)$, la scala delle lunghezze. La sua evoluzione nel tempo andrà determinata in base a principî appropriati, o in base ad opportune equazioni. Attenendosi al principio cosmologico perfetto, la teoria dell'universo stazionario richiede ad esempio che sia costante il rapporto $(dR/dt)/R$ cioè la costante di Hubble, che è direttamente osservata; ma è evidente che una piú vasta ed interessante scelta di modelli ci sarà fornita dalle equazioni della relatività generale. Si può (alquanto laboriosamente) dimostrare che con la metrica indicata, e quindi con la traduzione delle ipotesi fisiche che ne sono alla base, le sedici equazioni di Einstein si riducono all'unica equazione:

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right)R + \frac{1}{3}\Lambda R,$$

dove p rappresenta la pressione, e Λ è detta costante cosmologica. Quest'ultimo termine, assente dalla forma iniziale delle equazioni di Einstein, fu anche in questo caso introdotto perché divenisse possibile una soluzione statica, che ancora nel 1915 era considerata come l'unica ragionevole. In seguito alla scoperta di Hubble, Einstein si pentí amaramente di avere rovinato la bellezza delle sue equazioni con questa tardiva e forzata introduzione, chiamandola l'errore piú grande della sua vita. Tuttavia la costante cosmologica è stata piú volte riproposta in seguito, con alterna fortuna.

Come il lettore può verificare, e questo è davvero facile, ponendo p uguale a zero questa equazione diventa esattamente l'equazione a cui deve obbedire il raggio medio della nuvola nella trattazione newtoniana corretta con un termine repulsivo. Vale a dire che il modello non relativistico corrisponde a una situazione in cui si ammette che la pressione nel gas sia trascurabile: per questo si parla in genere di «nuvola di polvere».

Questa equazione, naturalmente, è stata l'oggetto di numerosi studi: se ne sono esaminate soluzioni particolari ed altri casi piú generali: in seguito si è anche rinunziato alla omogeneità e all'isotropia della metrica, ottenendo delle equazioni di Einstein diverse e piú complesse, a loro volta analizzate in dettaglio. Noi ci accontentiamo di considerare l'equazione scritta, ricordando che De Sitter studiò il caso $p = \rho = 0$ (universo vuoto); Einstein studiò il caso $d^2R/dt^2 = 0$

(universo statico); Friedmann studiò il caso $\Lambda = 0$, predicendo l'espansione dell'universo circa sette anni prima della sua scoperta; infine Lemaitre studiò alcuni modelli che prevedevano un'esplosione iniziale, ma in cui p e Λ erano diversi da zero.

Chiaramente, il numero di modelli che si possono considerare supera quello già vasto del caso non relativistico. Si può dare una rappresentazione grafica abbastanza esauriente dei casi comuni ai due punti di vista, che derivano ponendo $p = 0$, introducendo alcuni parametri opportuni calcolati ad un tempo t, corrispondente alla nostra epoca: H (la costante di Hubble), $\sigma = 4\pi G\rho/3H^2$ (il parametro di densità), $q = -(d^2R/dt^2)/RH^2$ (il parametro di decelerazione). Le equazioni relativistiche riscritte in termini di questi tre parametri diventano $\sigma - q = \Lambda/3H^2$, $3\sigma - q - 1 = k/H^2R^2$. Dalla conoscenza di H, q e σ si possono ottenere tramite queste relazioni i valori delle costanti k, Λ, ed i valori di R e ρ nella nostra epoca. Questi quattro valori individuano uno ed uno solo fra i possibili modelli di universo con pressione zero. È evidente quindi l'importanza che acquista la determinazione precisa, attraverso le osservazioni, dei tre parametri H, σ e q. Scegliendo H, costante di Hubble, come nota, si possono utilizzare i parametri σ e q come indipendenti, e si può costruire un diagramma sui cui assi sono riportate queste due variabili. Nelle varie regioni del piano si hanno modelli cosmologici con caratteristiche comuni, come è qualitativamente illustrato nella figura 10. Si ricordi però che i modelli relativistici possono discostarsi molto dai modelli non relativistici nel caso in cui la pressione non sia trascurabile: ciò dovrebbe accadere specialmente nei pressi della singolarità, cioè, in un modello di *big bang*, nelle fasi iniziali. All'epoca presente, invece, si osserva che il contributo dovuto alla pressione è del tutto trascurabile.

Esamineremo ora nell'ordine qual è la nostra attuale conoscenza dei tre parametri citati. Il valore che comunemente oggi si accetta per H è quello di 75 (km/sec)/Mpc, però non si escludono i valori compresi nell'intervallo fra 50 e 130(km/sec)/Mpc. Il motivo di questo ampio intervallo di valori risiede principalmente nel fatto che non si ha una determinazione precisa delle distanze; purtuttavia H è il parametro conosciuto con maggior precisione dei tre. Per σ la situazione non è ben definita, il suo valore dipende in modo critico anche dalla determinazione di ρ, la densità attuale di materia nell'universo. Questo valore è valutato con molta imprecisione. Il metodo, dovuto ad Oort, si basa sulla distribuzione di galassie e sulla stima della loro massa media in base alla luminosità. Si ottiene cosí una stima per la massa visibile (cioè quella della massa che emette nella banda ottica) di circa un atomo di idrogeno ogni dieci metri cubi, pari ad una densità di circa 10^{-31} g/cm^3. Questo valore, basato sulla massa visibile, riserva però delle sorprese. Se infatti si calcola il valore della massa richiesta perché un ammasso di galassie stia insieme per effetto della forza gravitazionale e lo si confronta con quella stimata col metodo precedente, i due valori non coincidono. Si possono dare due spiegazioni di questo fatto: o, semplicemente, l'ammasso non è tenuto insieme dalla gravitazione e quindi si sta disperdendo, oppure c'è della materia che è, per cosí dire, nascosta e che probabilmente è quello che è «avanzato» dopo la formazione delle galassie. Nel caso

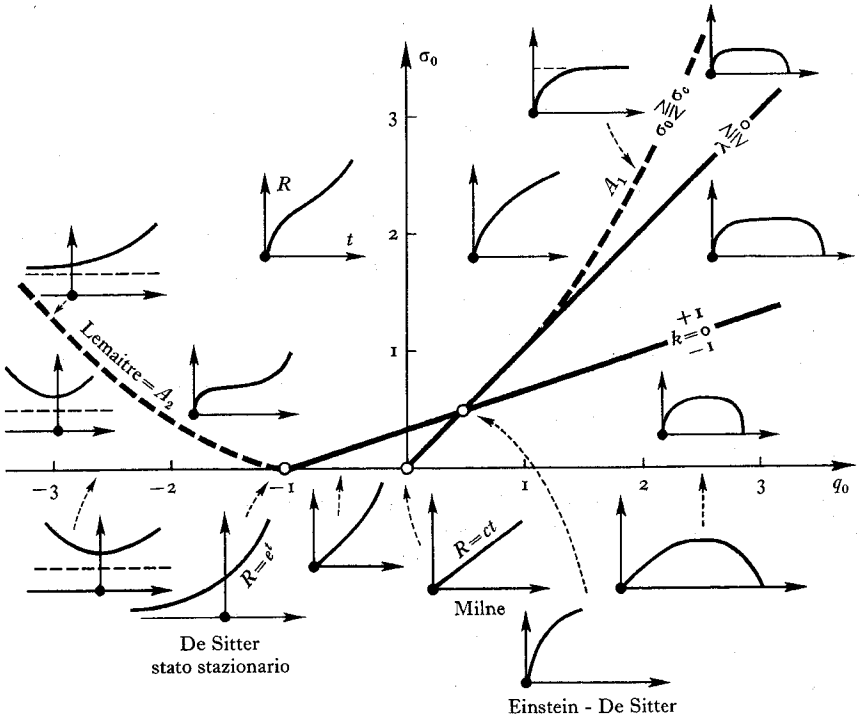


Figura 10.

L'andamento di $R(t)$ nei diversi modelli relativistici di universo ottenibili al variare dei parametri σ e q. Si suppone fissata la costante di Hubble e nulla la pressione. Si noti che la maggior parte dei modelli contengono una singolarità iniziale. (Da Hoerner, in G. L. Verschuur e K. I. Kellermann (a cura di), *Galactic and Extra-Galactic Radio Astronomy*, Springer, Berlin 1974).

che questa massa nascosta esista, di tutta la massa nell'ammasso in media solo il 3 per cento è visibile. Mettendo insieme la massa visibile e quella nascosta, il valore di σ può cosí variare da 0,30 (per il valor medio del rapporto fra le masse) a 20 (per il valore massimo del rapporto). Per q la situazione è ancora piú incerta. Se però fossimo sicuri che Λ è uguale a zero, q risulterebbe uguale a σ. Il metodo usato per la determinazione di q si basa su di una relazione fra il diametro angolare, di oggetti o di distanze fra coppie di oggetti associati, e il *redshift*. È ben noto da una formula elementare di geometria euclidea che un oggetto a distanza d da noi viene visto sotto un angolo φ inversamente proporzionale a d ($\varphi = D/d$, dove D è il diametro lineare dell'oggetto). Se l'oggetto ha *redshift* piccolo, si sa, dalla relazione di Hubble, che $d \simeq (c/H)z$ e quindi per piccoli *redshift* (per oggetti cioè relativamente vicini nello spazio e nel tempo) si

può dire che φ è inversamente proporzionale a z per uguali valori di D. Se l'oggetto ha *redshift* notevoli allora entrano in gioco effetti relativistici e bisogna ricordare anche che, su grandi distanze, può influire il fatto che l'universo non sia euclideo. Tenendo conto di tutti questi fattori si può far vedere che, per grandi z, φ crescerà al crescere di z. Necessariamente, visto l'andamento diverso a piccoli e grandi z, si dovrà ottenere un minimo per φ in un diagramma (φ, z). Poiché l'espressione completa collega φ, z, D e q, da una misura di φ, D e z si può determinare q. Le difficoltà con questo metodo sorgono, per gli oggetti visibili nella banda ottica, perché l'espressione, tramite il diametro lineare dell'oggetto, deve tenere conto anche dell'evoluzione della classe degli oggetti: se si riesce ad avere un'idea dell'evoluzione stellare, poco si sa dell'evoluzione delle galassie, pochissimo dell'evoluzione degli ammassi di galassie. Le cose peggiorano un po' se si considerano oggetti che emettono nella banda radio: non solo della loro evoluzione non si sa niente, ma si creano nuovi e piú profondi problemi che potrebbero coinvolgere la teoria. Infatti se si fa un diagramma (φ, z) con le radiogalassie e i quasar, tutti i dati sono contenuti sotto una curva di pendenza -1 anche per z grandi, dove invece la pendenza dovrebbe divenire positiva. Questo comportamento può corrispondere solo ad un universo euclideo e, per di piú, statico. Il tutto è un notevole rompicapo anche se si introducono correzioni dovute all'evoluzione degli oggetti radio: rimarrebbe da spiegare come è possibile che l'effetto dell'evoluzione in un universo non statico risulti in un comportamento di tipo statico.

Il problema sulla determinazione di q potrebbe essere aggirato trovando un'altra relazione che coinvolga un diverso parametro, ad esempio la curvatura. A questo scopo ricordiamo quanto si disse nel paragrafo 4.1, a proposito della possibilità di ricavare la curvatura dello spazio in cui ci troviamo, per mezzo della misura del volume di sfere concentriche di raggio crescente. Questo metodo è realmente applicabile in pratica, sotto certe ipotesi. Supponiamo di avere una popolazione uniforme di sorgenti di uguale luminosità assoluta. Il flusso F che riceveremo sarà naturalmente piú piccolo per sorgenti piú lontane. Noto il flusso, in un universo euclideo si ricava la distanza di ogni sorgente in base a formule già citate, $d = \sqrt{L/4\pi F}$. Il punto essenziale è che, *se la densità n di queste sorgenti non varia nello spazio e nel tempo*, il volume della sfera di raggio d è proporzionale al numero N_d di sorgenti contate fino alla distanza d. In uno spazio euclideo

$$N_d = n\left(\frac{4}{3}\pi d^3\right) = n\left(\frac{4}{3}\pi\right)\left(\frac{L}{4\pi F}\right)^{3/2}.$$

Ma in uno spazio ellittico il volume della sfera è dato da una formula diversa ed N_d cresce meno rapidamente in funzione di d, mentre in uno spazio iperbolico N_d cresce piú rapidamente. Dai conteggi delle sorgenti che hanno un flusso maggiore di F, per diversi valori di F, si potrà allora ricavare, in linea di principio, la curvatura dello spazio in cui ci troviamo. Naturalmente questo dà solo un'idea grossolana di queste misure, che sono estremamente complesse. In realtà ci si aspetta che i conteggi di sorgenti per uno spazio sia iperbolico sia

ellittico aumentino meno rapidamente che nel caso euclideo al decrescere di F. La ragione risiede nel fatto che il flusso da sorgenti lontane viene ridotto dall'effetto Doppler. Questo metodo si rivela ancora piú incerto e meno conclusivo del precedente per la determinazione di q: effetti connessi con l'evoluzione degli oggetti ed effetti intimamente collegati all'evoluzione dell'universo sono mescolati in modo inestricabile.

Da questa situazione poco soddisfacente, si può forse uscire attraverso l'acquisizione di nuovi dati sperimentali. Particolarmente promettenti sembrano le osservazioni radio basate sulla VLBI (*very long baseline interferometry* 'interferometria a base lunghissima'), che si vorrebbe illustrare. Molto brevemente, per riuscire ad ottenere una buona risoluzione (quello che in linguaggio corrente si dice «vedere lontano»), occorre un occhio delle dimensioni piú grandi possibili, e, come si è detto, esistono radiotelescopi del diametro di circa cento metri. Per quanto possa sembrare incredibile, queste prestazioni possono essere migliorate di molto. Nella banda radio è possibile sfruttare il fatto che non è necessario che il sistema ricevente («l'occhio») ottenga tutta la radiazione allo stesso tempo su tutta la superficie: l'informazione totale, cioè l'immagine della sorgente, può essere ricostruita anche se la radiazione arriva in tempi diversi, ma rigorosamente definiti, su regioni distinte. Nel caso della VLBI, si riceve informazione su due o piú radiotelescopi a distanza di migliaia di chilometri. La rotazione terrestre fa variare la posizione relativa dei punti di ricezione rispetto alla sorgente, ricostruendo una piú vasta superficie. È come se si fosse parzialmente ricostruito un occhio con un diametro, appunto, di migliaia di chilometri. Dunque il metodo VLBI, raggiungendo un'altissima risoluzione, permetterebbe di vedere molto lontano nello spazio e quindi nel tempo, definendo con precisione e rivelando anche eventuali spostamenti piccoli e/o rapidi delle sorgenti.

4.5. Un modello di successo: il *big bang* (moderna genesi).

Fin dal 1965, anno della scoperta della radiazione di fondo a 3 °K, si è avuto un interesse crescente per quello che è divenuto il modello cosmologico per eccellenza, e viene chiamato *hot big bang*, cioè 'grande esplosione iniziale ad alta temperatura'. Le ragioni del suo successo sono diverse: anzitutto apparve subito possibile spiegare in questo modo la maggior parte delle osservazioni, ed in particolare quella della radiazione di fondo. In secondo luogo, queste prospettive stimolarono un profondo studio teorico che, col contributo di praticamente tutti i campi della fisica, ha permesso la costruzione di un quadro abbastanza completo dell'evoluzione dell'universo. Infine, la maggior parte dei modelli rappresentati nella figura 10 iniziano con una singolarità, e, per l'epoca attuale, l'evoluzione dell'universo è qualitativamente indipendente dai valori dei vari parametri cosmologici, che, come abbiamo visto, sono in gran parte incerti. Il punto cruciale è l'ipotesi che l'universo abbia avuto inizio in uno stato praticamente omogeneo, di altissima (forse infinita) densità e temperatura. Come questa condizione iniziale si sia formata, è un problema a cui non solo questo modello, ma addirittura l'intera relatività generale non possono dare risposta, limitandosi a

stabilire le modalità della successiva evoluzione. Durante il primo secondo (!) dopo l'inizio, secondo queste analisi, temperatura e densità sono cosí alte che si stabilisce un equilibrio termodinamico completo tra ogni sorta di particelle elementari, dai fotoni ai gravitoni agli iperoni. Ciò significa che tutte le particelle hanno in pratica la stessa energia cinetica, e le loro abbondanze relative sono fissate in modo preciso dalla temperatura.

Ancora pochi secondi, e la temperatura scende a circa 10^{10} gradi, e la densità a 10^5 grammi per centimetro cubo: a questo punto le coppie di particelle e antiparticelle si sono ricombinate, le particelle instabili sono decadute in particelle stabili, e neutrini e gravitoni si sono disaccoppiati dalla materia, cioè hanno cessato di interagire con essa, propagandosi liberamente. Essi dovrebbero avere tuttora una distribuzione di energia di corpo nero, ma la loro temperatura dovrebbe essere scesa a 3 °K (espandendosi, l'universo si raffredda). L'osservazione di questa radiazione di fondo costituita di neutrini, e forse anche gravitoni, sarebbe un'attesa conferma del modello in questione. Gli altri costituenti dell'universo continuano ad interagire, conservando l'equilibrio termico fra radiazione e materia, e costituiscono gli elementi leggeri. La formazione avviene per mezzo di reazioni di fusione: se protoni urtano altri protoni o nuclei leggeri con sufficiente energia, le due particelle possono fondersi in un nucleo piú pesante, liberando energia, eventualmente sotto forma di fotoni, elettroni, positroni, neutrini. Dopo circa mille secondi la densità (e quindi la probabilità degli urti) e la temperatura (e quindi l'energia media delle particelle) sono divenute cosí basse che queste reazioni di fusione non possono piú avvenire. Per formare i nuclei pesanti bisogna prima formare quelli leggeri, e in questi primi mille secondi non si riesce a formare elementi piú pesanti del litio. Subito dopo questa fase, la materia risulta composta per tre quarti di idrogeno, un quarto di elio e tracce di altri nuclei leggeri; per gli elementi piú pesanti bisogna probabilmente attendere la formazione delle stelle. Dopo la formazione degli elementi leggeri e per circa centomila anni la radiazione (cioè i fotoni) predomina sulla materia, nel senso che nelle equazioni che reggono l'evoluzione del modello si possono trascurare i termini di pressione e densità che non si riferiscono alla radiazione. Questa inoltre impedisce alla materia di strutturarsi in condensazioni piú o meno stabili. Dopo centomila anni circa, però, la materia prende il sopravvento sulla radiazione, e i fotoni da questo istante si propagano quasi indisturbati, presentandosi alla nostra epoca appunto sotto forma di radiazione di fondo, con una distribuzione di energia (spettro) di corpo nero a circa 3 °K. La materia, invece, finora completamente ionizzata, incomincia a ricombinarsi, fino a che, nel periodo tra circa cento milioni ed un miliardo di anni costituisce ammassi di galassie, galassie e stelle, cioè i corpi celesti che vediamo ora. È probabile che dopo quest'epoca si formino anche gli oggetti quasi-stellari. Come questi oggetti condensati si formino, è tutt'altro che chiaro.

È infatti difficile spiegare come da un universo omogeneo possano spontaneamente generarsi delle fluttuazioni di densità tali da creare le strutture condensate di cui parliamo. D'altra parte l'idea che nello stato iniziale fossero precostituiti, per cosí dire, i germi delle future strutture è oggi assai poco attraen-

te. Anche peggio, un universo inizialmente caotico diverrebbe omogeneo nel giro di un paio di secondi. Il problema sembra ancora lontano dalla soluzione.

Pure con queste incertezze, il quadro che abbiamo dato appare plausibile, ed esistono numerosi indizi che tendono a confermarlo.

5. *Alcuni problemi aperti.*

5.1. Problemi riguardanti la relatività generale.

Nelle pagine che precedono abbiamo assistito al trionfo della relatività generale. Non si può dire che questa teoria, indubbiamente una fra le piú grandiose creazioni dell'intelletto umano, sia accettata universalmente. Tuttavia, il lavoro che si è fatto su questo schema supera di gran lunga quello svolto per altre teorie cosmologiche. Nelle pagine che seguono vorremmo presentare voci dissenzienti a cui non abbiamo accennato nel corso della nostra esposizione, e vorremmo presentare alcuni punti di vista per affrontare problemi che la relatività generale rifiuta di considerare.

Delle teorie soccombenti, quella dell'universo stazionario è forse la piú notevole: di essa ci si dovrebbe chiedere non perché sia stata pensata, ma perché non funzioni. Il Principio Cosmologico Perfetto, su cui questa teoria si basa, assume che non solo tutti i punti dell'universo ma anche tutti gli istanti del tempo sono, in media, equivalenti. In altre parole – ricordiamo – la mia descrizione dell'universo, qui ed ora, non deve differire dalla descrizione di un osservatore situato in altro luogo e in altro tempo. Esteticamente, sembra una richiesta assai ragionevole, ma non è soddisfatta dai modelli della relatività generale. Partendo dalla richiesta di una equivalenza fra tutti i sistemi di riferimento inerziali, o localmente inerziali, si finisce col trovare un sistema globale privilegiato (quello della polvere che si espande) e, in certo senso, assoluto. Non solo, ma in questo sistema l'universo si evolve, e non c'è equivalenza fra successivi istanti di tempo.

Ci sono altri problemi: lo spazio vuoto, in relatività generale, ha un notevole grado di realtà. Un modello con $\rho = 0$ si evolve secondo una legge ben definita, e ha una sua curvatura, che non è quindi attribuibile alla materia.

Inoltre non è chiarito il problema delle singolarità: ammessa, se si vuole, la loro inevitabilità, non è chiaro come trattarle in dettaglio. Nella singolarità iniziale, sembra che le particelle finiscano col non poter interagire le une colle altre, perché l'azione reciproca dovrebbe propagarsi a velocità superiore a quella della luce. Tutti gli universi di tipo *big bang* affermano una *comune ma distinta* origine di tutte le cose. Come ottenere poi nella successiva evoluzione un universo sostanzialmente omogeneo, è un problema non risolto.

Infine non è chiaro come trattare gli stati dell'universo che precedono o seguono le singolarità (l'inizio o la fine del mondo). Le leggi della fisica si perderebbero in questo passaggio, e non sembra possibile, come è stato dimostrato da Hawking ed Ellis, un universo articolato in cicli successivi di creazione, espansione, contrazione e distruzione.

5.2. Coincidenze numeriche.

La maggior parte dei modelli cosmologici ignora la struttura particellare della materia, considerando quest'ultima piuttosto come un fluido ideale continuo, in cui le interazioni nucleari e subnucleari, forti e deboli, vengono ignorate perché a corto raggio. Senza essere esplicitamente negata, viene quindi trascurata una relazione tra particelle e universo, tra microfisica e macrofisica. Ci sono però alcuni indizi dell'esistenza di una simile relazione. Usando le costanti fondamentali della fisica delle particelle e della cosmologia si possono costruire alcune espressioni adimensionali (cioè indipendenti dalle unità di misura usate) che assumono valori molto simili, o facilmente riconducibili gli uni agli altri. È importante rendersi conto della necessità di usare a questo scopo delle costanti adimensionali: ad esempio, la lunghezza di una circonferenza potrà essere 100 o 1, secondo che la si misuri in centimetri oppure in metri; il rapporto fra circonferenza e diametro sarà però sempre $\pi = 3{,}14\ldots$, in qualsiasi sistema di misura. Utilizzando opportune unità di misura si potrebbero costruire le piú sorprendenti coincidenze, assolutamente prive di interesse, per esempio tra l'altezza in metri della Grande Piramide, e la distanza in parsec della stella Antares.

Tra le seguenti espressioni, inevitabilmente dei rapporti, si scoprono le piú note coincidenze numeriche:

1) rapporto fra attrazione elettrostatica ed attrazione gravitazionale tra protone ed elettrone: $0{,}23 \cdot 10^{40}$;
2) rapporto fra raggio dell'universo e raggio dell'elettrone: $4 \cdot 10^{40}$;
3) numero totale di protoni (ed elettroni) nell'universo: $(10^{40})^2$;
4) rapporto fra energia a riposo ($= mc^2$) di una particella, ed energia potenziale dovuta all'attrazione gravitazionale di tutte le altre masse dell'universo: circa 1.

Mentre le costanti microscopiche sono note con ottima precisione, le costanti cosmologiche (numero di protoni nell'universo, costante di Hubble) sono note solo come ordine di grandezza, e non è escluso che alcune delle coincidenze che il lettore avrà subito notato migliorino in avvenire.

Un gruppo di teorie cosmologiche (dovute ad Eddington, Dirac e Jordan) tenta di servirsi dell'esistenza di queste relazioni come base per la costruzione di una cosmologia. I risultati non sono molto soddisfacenti, in quanto la base si rivela subito inadeguata, e, per poter procedere, occorre introdurre nuove, e piú peregrine, ipotesi. Si obietta inoltre che, dopo tutto, le coincidenze potrebbero essere dovute ad uno scherzo di natura, e che i risultati sperimentali sono per lo piú in contrasto con le predizioni teoriche ottenute su questa base. Vorremmo illustrare, a scopo di esempio, qualche speculazione fondata sulle coincidenze indicate. Si consideri l'espressione 2). Noi sappiamo che l'universo si espande, cioè il suo raggio aumenta col tempo. Ne derivano le seguenti possibilità: *a*) aumenta anche il raggio dell'elettrone, di modo che il rapporto rimanga costante nel tempo, e sia quindi conservata la coincidenza coi valori numerici 1) e 2);

b) il rapporto cambia nel tempo. Ma se vogliamo che le coincidenze si mantengano, questo, in virtú della 1), significa che cambia anche il rapporto fra attrazione elettrostatica ed attrazione gravitazionale: in virtú della 3) significa che vengono creati nuovi protoni ed elettroni. Dalla scelta fra queste due possibilità ed altre ancora, rivelate da un piú completo esame delle coincidenze numeriche, risultano le varie teorie, che, come si è detto, in parte urtano contro la diffidenza dei cosmologi, e in parte contro dati sperimentali sulla variazione nel tempo delle costanti fondamentali. (C'è da segnalare che Van Flandern nel 1975 ha sostenuto che vi è una variazione di G (costante gravitazionale) nel tempo. L'affermazione è basata sul confronto dei tempi di occultamento di stelle fisse da parte della Luna in epoche diverse: se l'intervallo fra occultazioni successive aumenta, vuol dire che il raggio dell'orbita della Luna è aumentato e quindi che la forza gravitazionale che lega la Luna alla Terra è diminuita).

La cosmologia non può comunque ignorare le altre parti della fisica, principalmente l'elettromagnetismo e la fisica delle particelle elementari, che studiano le altre due forze di importanza universale, oltre alla gravitazione. Questa esigenza fu sentita già da Weyl, il quale tentò assai per tempo (1918) di unificare elettromagnetismo e gravitazione, modificando in modo semplice, ma sostanziale, le basi della relatività generale. Le sue previsioni sono però considerate erronee, e contraddette dall'esperienza. Tentativi moderni sono invece rivolti alla «quantizzazione», cioè all'introduzione di concetti quantistici nella relatività generale. Questo programma non solo non è stato condotto a termine, ma non pare neppure vicino ad essere realizzato e per ora ci si accontenta di programmi parziali, che presentano peraltro notevoli difficoltà.

5.3. La freccia del tempo (moderna apocalisse).

Nel linguaggio comune si ripete frequentemente che il passato non ritorna: di fronte a questa affermazione si può reagire a livello psicologico in modo diverso, ma in fin dei conti la si accetta. Il fisico, invece, si trova dinanzi ad un paradosso. Le leggi della meccanica quantistica e classica (almeno fino al livello nucleare) non fanno distinzione fra passato e futuro. Se un fenomeno si evolve nel tempo da uno stato iniziale A ad uno stato finale B passando attraverso ben definiti stati intermedi, secondo le leggi della meccanica è anche possibile il fenomeno inverso, cioè l'evoluzione da B ad A passando attraverso gli stessi stati intermedi. I fenomeni astronomici, chimici, biologici, che avvengono su grande scala, dovrebbero essere scomponibili in fenomeni semplici, che obbediscono alle leggi della meccanica classica o quantistica (ipotesi non accettata da tutti, ma contro cui finora non esistono serie obiezioni). Perché allora l'evoluzione di praticamente tutti i sistemi macroscopici avviene in una precisa direzione (la «freccia del tempo») e l'evoluzione in senso inverso non è osservata? Perché insomma c'è una differenza fra passato e futuro? Ci si può dunque chiedere se esistano grandezze fisiche che si evolvono in una direzione precisa, ma la cui preferenza può essere stabilita in base a leggi microscopiche, che sono simmetriche rispetto al tempo. La termodinamica classica aveva creato un concetto nuovo, che porta il nome di entropia e forma il nucleo del cosiddetto secondo principio della termodinamica. Il primo principio afferma che in un sistema isolato possono funzionare solo quei meccanismi in cui l'energia è conservata; il secondo principio rincara la dose, affermando che, fra questi processi, in realtà sono ammessi soltanto quelli in cui non si ha una diminuzione globale dell'entropia. L'entropia è una grandezza alquanto astratta, ma considerato che essa definisce una precisa direzione dell'evoluzione macroscopica, ci si convinse che essa era legata alla «freccia del tempo». Ma sono le proprietà dell'entropia che impongono una freccia del tempo, o è la freccia del tempo che stabilisce le proprietà dell'entropia? Dapprima, con l'avvento della meccanica statistica, l'entropia fu interpretata come la misura del disordine di un sistema, e si fecero diversi tentativi per dimostrarne la proprietà di non decrescere nei sistemi isolati, sulla base di leggi fisiche microscopiche e simmetriche rispetto al tempo. Visto in questa luce, il secondo principio della termodinamica afferma che non tutti gli stati macroscopici di un sistema fisico sono ugualmente probabili, e che l'evoluzione avviene, come ci si può attendere, verso i piú probabili. Il coronamento di questi tentativi è rappresentato dall'argomento di Boltzmann (il teorema H), che però è oggi riconosciuto come ingannevole: su questa via, il problema della freccia del tempo non è ancora stato risolto. Legata all'atteggiamento opposto è l'ipotesi diversa, e piú interessante per noi, che l'irreversibilità sia legata a fenomeni che avvengono su scala cosmica. Ad esempio, Gold fece osservare che l'espansione dell'universo stabilisce una direzione privilegiata nel tempo. Anzi, suggerí che l'entropia venga accresciuta dall'espansione dell'universo.

Ma non esistono soltanto irreversibilità connesse con l'entropia. Ad esempio potrebbero verificarsi, a livello subnucleare, dei fenomeni che avvengono piú probabilmente in una direzione definita del tempo, speculazione che finora non ha avuto uno sviluppo sistematico, per quanto in parte confortata dai dati dell'esperienza (sistema $K^0-\bar{K}^0$). La stessa fisica classica presenta un tipo di irreversibilità non entropica. Nella teoria della radiazione dell'elettromagnetismo classico comunemente si afferma che una carica accelerata irradia, producendo un disturbo che si propaga in avanti nel tempo (soluzioni ritardate) che cioè raggiungerà luoghi sempre piú distanti in tempi sempre piú lontani nel futuro. Tuttavia le equazioni di Maxwell, su cui si basa la teoria classica della radiazione, prevedono anche soluzioni che corrispondono ad un disturbo che si propaga all'indietro nel tempo (soluzioni avanzate): queste soluzioni non sono osservate in natura, ma a priori manca una ragione per la loro assenza. In altre parole si osservano onde coerenti che divergono da una sorgente puntiforme, ma non si osservano abitualmente onde coerenti che convergono su di essa.

Secondo Feynman e Wheeler in realtà le soluzioni avanzate che coinvolgono una carica accelerata esistono, ma non sono osservate perché vengono esattamente cancellate dalle soluzioni avanzate prodotte da tutte le altre cariche dell'universo. In questa teoria una carica non potrebbe irradiare se non «sapesse» che nell'universo esistono altre cariche che assorbiranno totalmente la sua radiazione, punto di vista che ricorda da vicino il principio di Mach. La condizione dell'universo nel piú lontano futuro (tempo = infinito) assume dunque un

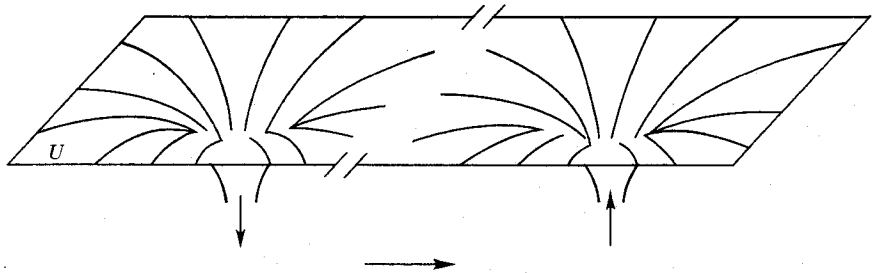


Figura 11.
Rappresentazione schematica dei buchi neri e buchi bianchi.

interesse particolare in questo contesto, perché dovrebbe informarci sullo stato degli assorbitori che determinano la radiazione attuale. Questo è, in altre parole, il problema della «fine del mondo», e ci pare giusto, al termine di questo articolo, presentare la moderna versione dell'apocalisse.

Per un universo chiuso con entropia crescente (diventa problematico parlare di entropia totale di un universo aperto) si era già prevista la «morte calda». Quando l'entropia avrà raggiunto il valore massimo consentito, praticamente tutti i meccanismi di trasformazione dell'energia si arresteranno, dai fenomeni meccanici a quelli biologici.

Ora, una simile prospettiva, anche se remota nel tempo, per qualche ragione non piace, e si sono suggerite diverse vie di scampo. Ad esempio si è trovato che la teoria della «creazione continua» può evitarci la temuta «morte calda». Oppure si può suggerire, in contrasto con l'accennato teorema di Hawking e Ellis, che l'universo sia ciclico, cioè si contragga ed espanda in cicli successivi. Si tratta di un universo senz'altro piú spettacolare, ma esso sembra solo posporre i nostri guai: a quanto pare l'entropia aumenterebbe di ciclo in ciclo rendendo sempre piú difficile l'esistenza di quei meccanismi di trasformazione dell'energia che soli possono permettere la vita.

Cosí infine si può supporre che la materia sia inghiottita da corpi collassati (buchi neri) con entropia massima, e venga poi riespulsa da altri corpi ancora piú ipotetici (buchi bianchi) con entropia minima. Per far questo occorrerebbe sfruttare una dimensione in piú: schematicamente il processo è rappresentato nella figura 11 dove il nostro universo è rappresentato dal piano *U*.

Ma qui siamo ormai entrati nel regno delle speculazioni che ancora non hanno ricevuto un'adeguata veste matematica, e, forse, non sono neppure classificabili come cosmologia. [G. C. e A. M.].

Il pensiero cosmologico tradizionale, che si svolgeva nell'ambito della **religione** e della filosofia (cfr. **filosofia/filosofie**), si basava tuttavia anche sull'**osservazione** astronomica (cfr. **astronomia**) e relativo apparato matematico (cfr. **matematiche**). Le teorie

cosmologiche moderne, legate ai progressi della **fisica** (cfr. **materia, luce, gravitazione**), hanno compiuto un passo decisivo con la rivoluzione geometrica (cfr. **geometria/topologia**) e la rivoluzione relativistica (cfr. **relatività, spazio/tempo**). I tentativi contemporanei di descrivere e spiegare la struttura e l'evoluzione dell'**universo** pongono in particolare i problemi dell'**ordine/disordine**, dell'irreversibilità, della direzione del tempo (cfr. **tempo/temporalità**). In quanto si è passati da cosmologie che, consapevolmente o no, mettevano l'uomo al centro dell'universo a un pensiero acentrato, il «principio cosmologico» va visto anche in termini di **centrato/acentrato** e di **locale/globale**, in quanto rilevanti nella costruzione di modelli e teorie (cfr. **modello, teoria**) che, a partire dai dati d'osservazione, unifichino il molteplice (cfr. **uno/molti**).

mmatica
di ri-
del-
g-

Gravitazione

1. *Dall'antichità a Galileo.*

Secondo la fisica moderna la *gravità* è una delle interazioni elementari, come l'elettromagnetismo e le interazioni nucleari. La sua caratteristica fondamentale è la sua universalità: non solo i cosiddetti corpi materiali, ma anche ogni forma di energia – per esempio la luce – interagisce gravitazionalmente con il resto dell'universo. Ovviamente gli effetti della gravità – il peso, la caduta dei gravi – devono essere stati notati fin dai nostri piú remoti progenitori; ma prima che la legge che li governa ricevesse una formulazione scientificamente accettabile, fu necessaria una lunga evoluzione del pensiero durata circa duemila anni: dai Greci a Newton. Ancor oggi molti non si ritengono interamente soddisfatti dalle teorie moderne sulla gravitazione.

Non è possibile, però, rendersi conto dello sviluppo storico delle idee sulla gravitazione – né su alcun altro concetto scientifico – senza aver ben chiara nella mente la fondamentale differenza tra il metodo scientifico degli antichi e quello moderno. Gli antichi filosofi sopravvalutavano le possibilità della deduzione; essi prendevano le mosse da un'ipotesi sulle cause – nel quadro di una concezione generale della realtà – e cercavano poi di «salvare i fenomeni», cioè di conciliare le osservazioni della natura con le loro deduzioni.

Ne deriva una differenza profonda tra il concetto moderno di «legge naturale», intesa come una affermazione generale dell'esistenza di una interdipendenza tra i fenomeni, e quello dell'antichità. Ludovico Geymonat afferma che «Anassimandro... fu il primo a introdurre nei fenomeni naturali il concetto di "legge", ricavandolo probabilmente da una esperienza politica, cioè dalle leggi vigenti nella costituzione della sua città» [1970, I, pp. 36-37].

Per noi moderni, la perfetta ripetizione di un ciclo di eventi richiede l'azione di una «macchina», che stabilisce tra di essi una interdipendenza rigida, automatica; l'intervento volontario (e arbitrario) di una «mente» umana o divina introduce invece un elemento aleatorio e imprevedibile. Questa concezione meccanicistica della realtà fisica si affermò, però, solo intorno al XVII secolo; per gli antichi l'ordine che si riscontra nei fenomeni naturali è l'indice di un disegno deliberato di una Intelligenza inerente alla natura o esterna e superiore ad essa. Quando Virgilio esclama: «Felix qui potuit rerum cognoscere causas», non intende come noi la concatenazione causale degli eventi, ma le motivazioni della volontà degli dèi che liberamente li determina.

Paradossalmente uno dei pochi pensatori dell'antichità che abbia aderito a una concezione meccanicistico-causale del mondo, sarà chiamato da Dante – interprete medievale della scienza aristotelica – «Democrito che 'l mondo a caso pone». Persino Epicuro, erede delle teorie atomistiche di Democrito, si rifiuta di accettare l'idea di una relazione causale necessaria tra i fenomeni, dotando gli atomi di una certa capacità di scelta o «libero arbitrio»: «Se final-

mente ogni lor moto sempre | Insieme si raggruppa, e dall'antico | Sempre con ordin certo il nuovo nasce, | Né traviando i primi semi fanno | Di moto un tal principio, il qual poi rompa | I decreti del fato acciò non segua | L'una causa dall'altra in infinito; | Onde nel mondo gli animali han questa, | Onde han questa, dich'io, dal fato sciolta | Libera volontà, per cui ciascuno | Va dove piú gli aggrada?» [Lucrezio, *De rerum natura*, II, vv. 355-65].

La maggior parte dei filosofi antichi e medievali segue l'opinione aristotelica che ogni sostanza ha nel mondo il suo posto «naturale»: la terra e l'acqua nelle parti piú basse, l'aria e il fuoco in quelle piú alte. Se una sostanza è allontanata dal luogo che le è proprio, tende a ritornarvi per ristabilire l'ordine disturbato. Perciò i gravi cadono e i corpi celesti rimangono all'altezza che è loro assegnata, ruotando intorno al centro di tutte le cose; il moto circolare è l'unico proprio di questi oggetti eterni, perché non fa variare la distanza dal centro, pur prolungandosi indefinitamente.

L'idea alternativa, quella pitagorico-platonica, trova pure molti seguaci: la materia dei diversi corpi ha una sua «tendenza» o «aspirazione» a riunirsi al corpo cui appartiene. Il moto naturale della materia «solare» è rivolto verso il Sole, quello della materia lunare verso la Luna, quello della materia gioviana verso Giove e cosí via; il moto opposto a quello naturale è un moto «violento», come quello impresso dal braccio a un sasso lanciato verso l'alto, e cesserà appena venga a mancare la causa che lo ha determinato.

I vertici della concezione greca del mondo fisico si raggiungono nelle dottrine opposte degli atomisti e degli stoici. Gli scritti degli atomisti sono andati purtroppo interamente perduti, mentre la teoria del πνεῦμα degli stoici è preservata in numerose opere e presenta un considerevole interesse per la gravitazione.

Come è noto, per Democrito e, piú tardi, Epicuro, il mondo è formato da «atomi» e «vuoto»; sembra che per essi l'unica interazione possibile tra gli atomi fosse quella per contatto, sia negli urti che avvengono durante il moto e sia per la facoltà di cui sono dotati di attaccarsi gli uni agli altri, come se fossero forniti di ganci o uncini, per formare aggregati di ordine superiore. Per gli stoici, invece, come per Aristotele, la natura aborrisce dal vuoto; il πνεῦμα (cioè 'vento', 'aria', ma anche 'anima') è concepito come un mezzo che pervade tutto lo spazio tra i corpi e anche all'interno dei corpi stessi. Il punto centrale della dottrina del pneuma è, però, che esso è capace di sostenere una 'tensione' (τόνος) che ha la funzione di conferire alla materia dei corpi – per se stessa passiva, inerte – le loro qualità. È cosí che si generano le forze di coesione, le proprietà fisiche (durezza, colore, ecc.) e anche si trasmettono le percezioni.

È facile vedere nel πνεῦμα un predecessore dell'«etere» o, meglio, dello «spirito» newtoniano, di cui si dovrà parlare piú avanti. Uno degli aspetti piú interessanti di questa teoria del πνεῦμα-spirito fu sviluppato da Posidonio di Rodi (I secolo a. C.), il quale vede nel πνεῦμα il veicolo della «simpatia», termine che egli impiega per descrivere l'interazione tra i corpi, tra cui anche quella per cui le sostanze aspirano a riunirsi alla sfera che è loro propria.

È notevole che Posidonio attribuisca alla simpatia l'interazione tra la Luna e la Terra che si manifesta nelle maree. «Bisogna riconoscere, – commenta Sambursky [1956, trad. it. p. 176], – che questa teoria era quanto di piú adeguato potesse esistere in un'epoca in cui la natura e l'universalità della forza di gravità era ancora sconosciuta».

È interessante ricordare a questo proposito un'opera minore di Plutarco, citata anche da Sambursky [*ibid.*, p. 252], *Sulla faccia che appare nel cerchio della luna*, in cui alcuni amici conversando sulla natura della Luna riportano e discutono le idee dei vari filosofi e scienziati del tempo. Insieme con idee assai primitive, come quella degli abitanti degli antipodi «che a guisa di tarme o di stellioni stiano sopra la terra con le parti brutte del corpo rivolte in su» [Plutarco, *Opuscoli*, LXIII, 7], ne sono riportate altre degne di veri scienziati, come Aristarco e Posidonio. «Ma la luna perché non caggia è aiutata dal moto e dall'impeto suo, nel modo che i sassi posti dentro le fionde e girati intorno ancor essi stan saldi; perché il moto conveniente alla natura spinge ciascuna cosa, se da qualcun altro altrove non è rivolto. Onde la gravezza non move la luna, perché il suo moto è vinto dalla conversione circolare: e piú conforme a ragione era il maravigliarsi, se ella stesse ferma sempre nel medesimo luogo, come sta la terra» [*ibid.*, 6]. A questo Sambursky commenta: «L'affermazione che il movimento di un corpo permane finché esso non viene deviato è in realtà la formulazione della legge d'inerzia» [1956, trad. it. p. 252].

In verità, precisamente la mancanza di una chiara consapevolezza della legge d'inerzia e delle altre leggi del moto sarà l'ostacolo principale al progresso della fisica fino a Galileo e Newton. Basta pensare alle discussioni sui concetti fondamentali del moto da parte di Zenone di Elea, con i suoi famosi «paradossi», fino alle interminabili diatribe degli scolastici sull'*impetus* e sulla *virtus impressa*.

Lo stesso Copernico, diciotto secoli dopo Aristarco e sedici dopo Posidonio, mostra ancora di seguire l'opinione platonica: «Per parte mia, credo che la gravità non sia altro che una certa brama naturale, attribuita alle parti dalla divina provvidenza dell'artefice di tutte le cose, affinché si riuniscano nella loro unità e integrità congiungendosi in forma di globo. E questa inclinazione è credibile sia insita anche nel Sole, nella luna e negli altri splendori erranti, cosicché per la sua efficacia essi restano in quella rotondità con cui si presentano, sebbene in molti modi effettuino i loro circuiti» [1543, trad. it. p. 83].

Ciò dimostra che in Copernico non si ha ancora una rottura completa con la filosofia classica (platonica) e potrebbe forse spiegare l'attitudine tollerante e talora addirittura favorevole degli ambienti accademici e religiosi ufficiali, specie se confrontata con l'intolleranza verso Galileo. In fondo, almeno in apparenza, l'ipotesi eliocentrica poteva passare, come presentata da Osiander nella «lettera al lettore» posta come prefazione al *De revolutionibus* e come tentò di fare anche Galileo – ma con cosí scarsa convinzione da non riuscire a ingannare nessuno sulle sue vere intenzioni – per un comodo artificio matematico. Ma nella fisica galileiana c'era ben altro: si trattava della concezione «materialistica» dei fenomeni naturali in contrasto con quella «spiritualistica».

Il dualismo «materia/spirito» che la scienza greca – con l'eccezione di Democrito – aveva risolto introducendo un'intelligenza nella natura, si ripresentava piú violento che mai ed era ben evidente che la scienza moderna di cui Galileo era un antesignano avrebbe tentato di risolverlo eliminando dal mondo fisico lo spirito.

Sotto questo aspetto, come Galileo è il primo tra gli scienziati moderni, Keplero appare l'ultimo dei grandi scienziati medievali. Nel leggere qualcuna delle opere di Keplero, l'*Epitome astronomiae Copernicanae* o le *Harmonices mundi*, quando si confrontano con la coerenza e la lucidità dei *Dialoghi* galileiani, si è colpiti dallo strano modo con cui vi si alternano intuizioni fisiche geniali con idee mistico-pitagoriche per noi del tutto incomprensibili.

Come gli scolastici, Keplero riteneva che i corpi possedessero una specie di «inerzia» naturale, per cui si rendeva necessaria per il moto l'azione di un «movente»; cessata quest'azione, doveva cessare anche il moto: «Cessante causa cessat effectus». Cosí egli spiega che il Sole possiede un'«anima motrice», che ne mantiene la rotazione; a sua volta questa trascina i pianeti nel loro moto orbitale. Ma il Sole non possiede «mani per afferrare il pianeta a una distanza cosí grande»; perciò «la virtú del suo corpo si trasmette lungo linee rette per tutta l'estensione dell'universo, ruotando come un vortice velocissimo» [1618-22, libro IV, parte II, cap. III]. Sembra che egli pensasse a queste linee come noi pensiamo alle linee di forza di un campo magnetico, salvo ad attribuire loro un'azione trasversale; e, in effetti, egli afferma che l'azione è simile all'attrazione tra la calamita e l'ago magnetico, ricavandone una spiegazione del moto ellittico.

Curiosamente, come nota Crombie [1959, II, p. 194], ci fu una specie di complementarità tra Galileo e Keplero come precursori della sintesi newtoniana. Keplero non comprese mai il significato della legge d'inerzia e Galileo non riuscí a valutare l'importanza del moto ellittico, la cui dimostrazione da parte di Keplero egli giudicava cosí oscura da sembrargli che l'autore non sapesse di cosa stava parlando.

2. *Galileo e Newton.*

«SALV. Io non ho detto che la Terra non abbia principio né esterno né interno al moto circolare, ma dico che non so qual de' dua ella si abbia; ed il mio non lo sapere non ha forza di levarglielo. Ma se questo autore sa da che principio sieno mossi in giro altri corpi mondani, che sicuramente si muovono, dico che quello che fa muover la Terra è una cosa simile a quella per la quale si muove Marte, Giove, e che e' crede che si muova anco la sfera stellata; e se egli mi assicurerà chi sia il movente di uno di questi mobili, io mi obbligo a sapergli dire chi fa muover la Terra. Ma piú, io voglio far l'istesso s'ei mi sa insegnare chi muova le parti della Terra in giú.

«SIMP. La causa di quest'effetto è notissima, e ciaschedun sa che è la gravità.

«SAL. Voi errate, signor Simplicio; voi dovevi dire che ciaschedun sa ch'ella si chiama gravità. Ma io non vi domando del nome, ma dell'essenza della cosa» [Galilei 1632, ed. 1970 p. 284].

Ma la questione dell'«essenza» è accantonata da Galileo, perché considerata prematura. «Non mi par tempo opportuno d'entrare al presente nell'investigazione della causa dell'accelerazione del moto naturale, intorno alla quale da varii filosofi varie sentenzie sono state prodotte, riducendola alcuni all'avvicinamento al centro, altri al restar successivamente manco parti del mezo da fendersi, altri a certa estrusione del mezo ambiente, il quale nel ricongiugnersi a tergo del mobile, lo va premendo e continuamente scacciando; le quali fantasie con altre appresso converrebbe andare esaminando e con poco guadagno risolvendo» [Galilei 1638, ed. 1958 p. 185].

L'essenza del metodo galileiano-newtoniano sta appunto in questo: da un lato lo scienziato nutre una fede profonda nell'uniformità delle cause, dall'altro egli non ritiene necessario preoccuparsi eccessivamente della loro «natura»; molto piú importante è raggiungere una descrizione accurata dei fenomeni in forma matematica. Qualunque sia la natura della gravità, secondo Galileo, essa «deve» agire tanto sui corpi che cadono sulla superficie della Terra, quanto sul moto di Marte, Giove e anche della Terra: il copernicanesimo è fuori discussione! Quindi anzitutto si cercherà di scoprire come si muovono tutti questi corpi e successivamente si «dovrà» trovare – se non Galileo stesso, chi verrà dopo di lui – che un'unica legge di gravità «spiega» sia la legge della caduta dei gravi e sia quella dei moti planetari: le leggi di Keplero, che peraltro Galileo non aveva mai apprezzato nella loro giusta importanza. In tal modo si sarà compiuto un progresso verso la conoscenza della gravità ben maggiore che con tutte le speculazioni degli antichi, liquidate da Galileo con il termine sprezzante di «fantasie».

Accanto alla legge d'inerzia si devono a Galileo due scoperte fondamentali per lo studio della gravità: l'espressione matematica del «moto naturale», cioè del moto di caduta dei gravi, e l'indipendenza dell'accelerazione dalla massa del corpo che cade. A queste Galileo perviene rinunziando a speculare sull'essenza della gravità, ma applicando il suo metodo dell'«esperienza sensata», cioè dell'esperienza preceduta e seguita da un ragionamento che permetta di eliminare le circostanze accessorie e accidentali onde cogliere l'essenzialità dei fatti osservati.

Noi vediamo che i corpi in moto tendono ad arrestarsi; ma ciò si deve all'attrito della superficie su cui si muovono o alla resistenza del mezzo. Si tolga via ogni attrito e ogni resistenza e il corpo continuerà a muoversi indefinitamente in linea retta e con la stessa velocità. Qui Galileo per la sua dimostrazione si serve di un'esperienza «ideale», cioè di un'esperienza che non può essere effettuata in pratica, ma tanta è la sua fede nella ragione e nella sua capacità d'interpretare la realtà, che farà esclamare a Salviati: «Io senza esperienza son sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perché cosí è necessario che segua» [1632, ed. 1970 p. 177].

Nello stesso modo non sembra che Galileo abbia mai eseguito la famosa esperienza della torre di Pisa per dimostrare che il tempo di caduta è identico

per tutti i gravi; la conclusione viene inferita da esperienze eseguite soprattutto con pendoli di materiali diversi, date le difficoltà dell'osservazione diretta, come descritto nella Giornata prima dei *Discorsi intorno a due nuove scienze*.

Il fatto che un corpo seguiti a muoversi con moto rettilineo e uniforme, se una forza applicata non interviene a modificare la velocità, mostra chiaramente che deve esistere una certa equivalenza tra «forza» e «variazione del moto», un concetto che sarà sviluppato da Newton e ripreso in altra forma molto piú avanti da Einstein. Ma già una ventina d'anni dopo la morte del Maestro, un allievo di Galileo, Giovanni Alfonso Borelli – considerato da Newton come un precursore – scriveva: «Per di piú è certo che il movimento circolare conferisce al mobile un "impetus" che lo spinge ad allontanarsi dal centro della sua rivoluzione. Supporremo, quindi, che il pianeta tenda ad avvicinarsi al Sole e che allo stesso tempo, mediante l'"impetus" del movimento circolare, esso accolga l'"impetus" ad allontanarsi dal centro del Sole. Ne risulterà, allora, finché le forze contrarie restano uguali (l'una è compensata, infatti, dall'altra), che il pianeta non può diventare né piú vicino, né piú lontano dal Sole, oltre uno spazio certo e determinato [cioè dovrà oscillare intorno a una distanza media compiendo un moto ellittico kepleriano]; perciò apparirà come in equilibrio e galleggiante» [citato in Rossi 1973, p. 177].

Sarebbe bastato applicare quest'idea alla legge della «forza centrifuga» scoperta da Huygens

$$\text{Forza} = \frac{4\pi^2 mr}{P^2},$$

dove m è la massa del mobile, r la sua distanza dal centro di rotazione e P il periodo, e alla terza legge di Keplero, che per un moto circolare è rappresentata dall'equazione

$$\frac{P^2}{r^3} = \text{costante},$$

per ricavare, eliminando il periodo,

$$\text{Forza} = \text{costante} \times \frac{m}{r^2}.$$

La terza legge di Newton (legge dell'azione e reazione) richiede poi che la quantità che abbiamo indicato con 'costante' sia proporzionale alla massa M del Sole. In tal modo si giunge alla *legge newtoniana della gravitazione universale*

$$\text{Forza} = G\frac{Mm}{r^2},$$

dove G è una «costante universale» (la costante della gravità). In parole: i corpi si attirano tra loro con una forza proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro reciproca distanza.

Cosí, pochi anni dopo la morte di Galileo i tempi erano maturi per la scoperta della legge della gravitazione. In effetti sembra che vari scienziati contemporanei di Newton, tra cui Wren, Halley e soprattutto Hooke, conoscessero la legge dell'inverso del quadrato della distanza prima della pubblicazione dell'opera immortale di Newton *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*; ma naturalmente spetta a Isaac Newton il merito della grande scoperta e della spiegazione dinamica dei moti dei corpi del sistema solare. Con una generalizzazione di un'audacia senza precedenti, Newton affermerà poi che la sua legge deve estendersi a tutte le masse esistenti nell'universo.

In questa affermazione dell'universalità della legge della gravitazione consiste a mio parere la grandezza del genio di Newton e ancora una volta vi si scorge la fede dello scienziato nella potenza della ragione umana. Per la prima volta nella storia del pensiero scientifico è affermata in termini matematici rigorosi la legge di un'azione fisica che si estende a tutto l'universo e che doveva ricevere nei secoli successivi una serie di conferme sperimentali quale nessun'altra, con la sola possibile eccezione delle leggi dell'elettromagnetismo. Merita rileggere, anche se notissima, la pagina conclusiva dello Scolio generale dei *Principia*, da cui appare quanto Newton fosse consapevole di aver compiuto l'impresa scientifica piú grande della storia e, nello stesso tempo, del fatto che il progresso della scienza non terminava con la sua impresa.

«Fin qui ho spiegato i fenomeni del cielo e del nostro mare mediante la forza di gravità, ma non ho mai indicato la causa della gravità. Questa forza nasce interamente da qualche causa che penetra fino al centro del Sole e dei pianeti, senza diminuzione della sua capacità... La sua azione si estende per ogni dove ad immense distanze sempre decrescendo in proporzione inversa al quadrato delle distanze... In verità non sono ancora riuscito a dedurre dai fenomeni la ragione di queste proprietà della gravità, e non invento ipotesi... Ed è sufficiente che la gravità esista di fatto, agisca secondo le leggi da noi esposte, e spieghi tutti i movimenti dei corpi celesti e del nostro mare.

«Ora sarebbe lecito aggiungere qualcosa circa quello "spirito" sottilissimo che pervade i grossi corpi,... mediante le forze e le azioni del quale le particelle dei corpi a distanze minime si attraggono mutuamente e divenute contigue aderiscono intimamente; i corpi elettrici agiscono a distanze maggiori, tanto respingendo, quanto attraendo i corpuscoli vicini; la luce viene emessa, riflessa, rifratta, inflessa, e riscalda i corpi; tutta la sensazione è eccitata e le membra degli animali si muovono a volontà, ossia mediante le vibrazioni di questo spirito, si propaga attraverso i filamenti solidi dei nervi, dagli organi esterni dei sensi al cervello, e dal cervello ai muscoli. Ma queste cose non possono essere esposte in poche parole; né vi è sufficiente abbondanza di esperimenti, mediante i quali le leggi delle azioni di questo spirito possano essere accuratamente determinate e mostrate» [1713, trad. it. pp. 795-96].

3. *Da Newton alla fine del secolo XIX.*

Dal brano riportato dei *Principia* emerge chiaramente come Newton avesse in mente qualcosa che richiama il πνεῦμα degli stoici come veicolo delle interazioni tra i corpi – inclusa la gravitazione – e piú in generale come elemento

indispensabile per la spiegazione dei fenomeni del mondo fisico, non esclusi quelli fisiologici. Nello stesso tempo dichiara francamente che per lui la cosa essenziale non è la «causa» della gravità, ma il suo modo di agire e il fatto che essa sia in grado di render conto del moto dei corpi celesti e delle maree.

Questo atteggiamento pragmatico, che si potrebbe definire «positivista», attirò immediatamente sulla fisica newtoniana la critica di un filosofo come Berkeley e quella dei fisici cartesiani. La critica berkeleyana verrà esaminata in seguito; quella dei cartesiani prende le mosse dalla convinzione che i fenomeni naturali devono essere spiegati da cause «meccaniche». Nella dottrina di Descartes il «meccanicismo» assume un carattere dogmatico: le uniche proprietà evidenti, e quindi accettabili, dei corpi sono «estensione», «movimento» e «impenetrabilità»; ogni altra proprietà deve essere riducibile a queste tre, altrimenti è una «virtú occulta» e come tale va bandita da una spiegazione scientifica (meccanica) dei fenomeni.

Perciò Descartes, per spiegare la gravità, suppone l'esistenza di un fluido sottilissimo, sede di un moto vorticoso che interagisce con i corpi celesti comunicando loro le azioni necessarie a farli muovere nel modo osservato. Questo «etere» cartesiano era però qualcosa di molto diverso dallo «spirito-πνεῦμα» di Newton, del quale questi dichiara (in una famosa lettera al cappellano Bentley) di aver lasciato alla meditazione dei lettori decidere se questo agente sia materiale o immateriale. Si trattava di un vero e proprio fluido, che agisce secondo le leggi dell'idrostatica, altrimenti tutta la dottrina delle cause meccaniche sarebbe rimasta monca e incoerente.

Ma questo Newton non poteva ammetterlo; tutto il secondo libro dei *Principia* è dedicato alla meccanica dei fluidi con mira all'applicazione alle proprietà dei «vortici» cartesiani e il verdetto è durissimo: «L'ipotesi dei vortici urta totalmente contro i fenomeni astronomici e conduce non tanto a spiegare quanto ad oscurare i moti celesti» [1713, trad. it. p. 593].

D'altra parte un fisico del XVIII secolo era costretto come Huygens ad ammettere «l'esattezza dei calcoli e delle equazioni di Newton, ma essi non gli fornivano una "spiegazione". Non davano una risposta alle domande poste da lui e dai suoi colleghi francesi: quale è l'origine dell'attrazione? perché due corpi che non hanno alcun contatto sono spinti l'uno verso l'altro? se lo spazio è pieno di materia, questa materia con il suo contatto, con la sua pressione e attrazione, trasmette il moto; noi vediamo che l'acqua corrente e il vento trascinano gli oggetti con loro; queste sono forze meccaniche, facilmente comprensibili. Ma un'attrazione da lontano, attraverso lo spazio vuoto non è concepibile come azione meccanica» [Pannekoek 1951, trad. ingl. p. 273].

Anche il grande matematico Eulero si schiera decisamente contro l'attrazione a distanza, pur riconoscendo di non sapere esattamente come agiscono i vortici cartesiani. Con le parole di Jean Bernoulli: «Ma quando si tratta di spiegare la causa della gravitazione dei pianeti rispetto al sole, e per quale ragione questi corpi celesti non incontrano nessuna resistenza da parte del mezzo in cui si muovono, è stato necessario azzardare due ardite ipotesi, che ripugnano agli spiriti abituati ad accettare in fisica solo princípi incontestabili ed evidenti. La prima di queste ipotesi consiste nell'attribuire ai corpi una virtú o facoltà attrattiva, per la quale si attraggono reciprocamente senza l'aiuto di nessun'altra azione. La seconda consiste nel supporre nel mondo un vuoto perfetto» [Cantelli 1958, p. 891].

Il fatto che le idee di Descartes prevalessero tra gli scienziati continentali, mentre quelle di Newton dominavano tra quelli inglesi, mostra che alla questione scientifica si mescolava anche un certo orgoglio o pregiudizio nazionale, che non mancò di attirare l'ironia di Voltaire: «Un francese che arriva a Londra trova le cose veramente cambiate, in filosofia come in tutto il resto. Ha lasciato il mondo pieno; lo ritrova vuoto. A Parigi, l'universo lo si vede composto di vortici di materia sottile; a Londra, non si vede niente di tutto ciò. Da noi, è la pressione della luna che causa il flusso del mare; presso gli Inglesi è il mare che gravita verso la luna... Per i vostri cartesiani tutto avviene per un impulso che non si comprende affatto; secondo Newton, per un'attrazione di cui non si conosce meglio la causa... A Parigi, la terra ve la immaginate fatta come un melone; a Londra è appiattita ai due lati» [1727-33, trad. it. p. 76].

Come risponde Newton alle critiche mosse alle sue teorie durante la sua vita? «Mi sembra poi che queste particelle [gli atomi] possiedano non solo una "vis inertiae" [cioè una massa], ma che sono anche mosse da certi princípî attivi come quello della gravità e quello che produce la fermentazione dei corpi. Questi princípî io li considero non come "qualità occulte"... ma come leggi generali della natura, per cui le cose stesse sono state formate, la loro verità essendo manifesta nei fenomeni, anche se le cause non sono ancora state scoperte... Dire che ogni specie di cose possiede una specifica qualità occulta, è un'affermazione vuota di significato; ma scoprire nei fenomeni due o tre princípî generali di moto [= forze o interazioni elementari] e mostrare poi come le proprietà e le azioni di tutti i corpi seguono da questi princípî rendendoli manifesti, è un grande progresso nella filosofia, anche se le cause dei princípî rimangono da scoprire. Perciò non mi faccio scrupolo di proporre i princípî di moto anzi menzionati, data la loro generalità, e lascio ad altri di scoprirne le cause» [1704, *quaestio* XXXI].

La disputa sulle proprietà occulte tra cartesiani e newtoniani continuerà, però, in quasi tutto il secolo XVIII e si concluderà con l'accettazione pragmatica dell'attrazione newtoniana da parte del mondo scientifico; d'Alembert, ritorcendo le critiche dei cartesiani, afferma che le cosiddette «qualità evidenti» non sono meno misteriose dell'attrazione a distanza: «La proprietà o virtú per cui un corpo ne sospinge un altro comunicandogli il movimento è qualcosa di molto oscuro e il fatto che un corpo, colpendo un altro corpo, lo rimuove dal suo posto, sembra debba meravigliarci quasi quanto ci meraviglia il fatto di vedere un pezzo di ferro precipitarsi verso un magnete o una pietra cadere verso la terra» [1765, p. 635].

È, quindi, un'illusione pensare che le qualità cartesiane ci permettano di «capire» la realtà fisica meglio che l'attrazione newtoniana. Invero la fisica del XX secolo ha spazzato via completamente proprio le «qualità evidenti».

Come si può parlare dell'«estensione» di un elettrone o di un'altra particella descritta da una «funzione d'onda»? che «moto» è quello rappresentato dalla propagazione di una distribuzione di probabilità? che significato ha l'«impenetrabilità» di particelle i cui urti sono descritti mediante diagrammi di Feynman? Per noi le «vere» proprietà fondamentali sono proprio quelle che un cartesiano avrebbe chiamato «occulte»: massa, carica elettrica, momento magnetico, spin e via dicendo; da esse dipendono le interazioni fondamentali (i principî generali di moto newtoniani): gravità, elettromagnetismo, interazione debole e forte (oltre a quelle che eventualmente rimangono da scoprire).

Per quanto concerne la meccanica, nel resto del secolo XVIII e nel XIX ci si preoccupa soprattutto di formulare le leggi del moto in una forma generale applicabile a tutti i problemi particolari (Maupertuis, d'Alembert, Lagrange, Hamilton...) e delle sue applicazioni ai moti celesti (Clairaut, Laplace, Cauchy...) ricavandone brillanti conferme sperimentali che fanno passare in seconda linea il problema dell'etere e qualche piccola, ma inquietante, discrepanza (come l'avanzamento del perielio di Mercurio). Solo verso la fine del secolo scorso la critica dei concetti fondamentali, forza, massa, gravità (a cui si aggiungerà ben presto quella delle nozioni di spazio e di tempo), riprenderà su basi del tutto nuove.

Bisogna però mettere in evidenza l'introduzione di un concetto che assumerà un ruolo fondamentale, quello di «energia». Questa, che può considerarsi come la grandezza piú importante di tutta la fisica, fu confusa fino al XIX secolo con altre grandezze come «forza», «impulso»... come lo dimostra la famosa disputa tra leibniziani e cartesiani sulla «forza viva» e sulla «quantità di moto». Il termine ἐν-έργεια significa propriamente 'lavoro (ἔργον) immagazzinato' e quindi indica la capacità di un corpo di eseguire un lavoro (tipicamente sollevare un peso), acquisita o per effetto del suo moto – «energia cinetica» o «forza viva», in opposizione alla pressione del corpo su di un supporto o «forza morta» – o della sua posizione – «energia potenziale», come nel caso di un peso attaccato all'estremità di una fune che può sollevare un secchio d'acqua appeso all'altra estremità mediante una carrucola.

Verso la metà del secolo scorso, specialmente ad opera di Mayer, Helmholtz, Joule, ecc. si riconobbe che anche il calore dei corpi può produrre lavoro e, in tal modo, si fece strada l'idea di una grandezza che può presentarsi sotto diverse forme (meccanica, termica, chimica, elettromagnetica, ecc.) e quindi si può misurare in modi diversi – tipicamente mediante il prodotto di una massa per il quadrato di una velocità o di una forza per una distanza – ma è tale che in tutti i fenomeni fisici la sua quantità totale rimane sempre la stessa.

Venivano cosí ad essere ridotti a un unico principio (conservazione dell'energia) varie leggi fisiche (come il teorema di Bernoulli nell'idrodinamica, l'integrale delle forze vive, ecc.). In particolare ciò rendeva necessario associare a ogni forza dipendente dalla posizione relativa di due o piú corpi una forma particolare di energia, la forza stessa essendo il «gradiente» (con segno cambiato) di questa «energia potenziale».

Nel caso particolare della gravità, da tempo si era trovato conveniente impiegare il «potenziale» o «funzione delle forze», V, e Laplace aveva trovato che nel vuoto V soddisfa l'equazione differenziale

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0,$$

essendo x, y, z, coordinate cartesiane; questa equazione fu estesa poi all'interno dei corpi (Poisson) nella forma

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=-4\pi G\rho$$

dove G è la costante della legge di Newton e ρ la densità.

In questa formulazione della legge di gravità si afferma, implicitamente, l'idea rivoluzionaria che lo spazio vuoto possiede la capacità di conferire ai corpi delle proprietà fisiche, come l'energia. Cioè, in un certo senso, l'energia non risiede nei corpi, ma nello spazio. È questa l'origine dell'idea moderna di «campo», che verrà a sostituire l'etere cartesiano e a risolvere il dilemma newtoniano se l'agente che determina l'attrazione gravitazionale sia «materiale o immateriale» in favore di un agente «immateriale».

4. *Critica dei concetti newtoniani di spazio e tempo.*

Spazio e tempo, per Newton, sono concetti «assoluti». «Non definisco tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti... Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente... Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale e immobile... Il moto assoluto è la traslazione da un luogo assoluto a un luogo assoluto...» [1713, trad. it. p. 101].

Chiaramente anche per Newton il moto che noi osserviamo è quello relativo di un corpo rispetto a uno o piú altri; ma in lui è ancora viva la convinzione che si possa distinguere una realtà spazio-temporale assoluta – come potrebbe contemplarla una intelligenza «dal di fuori» – da quella relativa, come appare a un osservatore che, come noi, ne fa parte.

Già con Berkeley, però, ha inizio la critica a questo punto di vista. «Nonostante ciò che è stato detto, deve confessare che non mi sembra che ci possa essere altro moto che quello relativo: cosí che per concepire il movimento, devono venir concepiti almeno due corpi... Quindi, se non esistesse altro che un corpo, esso non potrebbe venir mosso» [1710, trad. it. p. 102].

Questa critica viene ripresa verso la fine del secolo scorso da quel grande filosofo della fisica che fu Mach. Per dare un significato alla legge d'inerzia è necessario definire previamente il moto uniforme e rettilineo. «Chiamiamo uniforme quel moto, nel quale incrementi uguali di spazio corrispondono a incrementi uguali di spazio in un moto di riferimento (la rotazione della terra).

Un moto può essere uniforme solo in rapporto a un altro. Il problema se un moto sia uniforme in sé è privo di significato» [1883, trad. it. p. 241].

In altre parole, per misurare intervalli spaziali e temporali occorrono «regoli rigidi» e «orologi»; questi ultimi sono rappresentati da «moti di riferimento» – modernamente i moti periodici dei sistemi atomici. Ma qualunque affermazione circa il moto non ha significato se non relativamente a questi.

Newton credeva di aver provato almeno l'esistenza di una «rotazione assoluta» con l'esperimento del secchio rotante. Se si mette in rotazione un secchio pieno d'acqua intorno al suo asse, supposto verticale, dapprima l'acqua non partecipa alla rotazione e la sua superficie libera è un piano orizzontale; in questo momento, afferma Newton, l'acqua è «assolutamente» immobile, ma ruota rispetto al secchio in senso inverso alla rotazione di questo. Un poco alla volta però la rotazione del secchio si trasmette all'acqua e contemporaneamente la superficie libera di questa si incurva sollevandosi in vicinanza del bordo. Alla fine l'acqua ruota rigidamente con il secchio e quindi è «immobile» relativamente ad esso; ma il sollevamento della superficie libera vicino al bordo fa vedere che esiste una differenza tra questa rotazione (assoluta secondo Newton) e quella iniziale (relativa al secchio).

Secondo Mach, questo esperimento non prova l'esistenza di una rotazione «assoluta»; esso dimostra invece che l'inerzia non è una proprietà intrinseca o assoluta dei corpi, ma è il risultato della loro interazione con tutte le altre masse dell'universo. Perciò «la rotazione relativa dell'acqua rispetto alle *pareti* del secchio non produce forze centrifughe percettibili, ma... tali forze sono prodotte dal moto rotatorio relativo alla massa della terra e agli altri corpi celesti» [*ibid.*, p. 249].

Questo è il famoso principio di Mach, che tanta parte ha avuto nel sorgere della teoria della relatività, per dichiarazione dello stesso Einstein.

A questo punto sorge la questione dell'«etere», il mezzo che pervade tutto l'universo e che non solo Huygens, ma anche Young e Fresnel ritenevano necessario per spiegare la propagazione della luce e avrebbe potuto anche trasmettere le azioni gravitazionali, elettriche e magnetiche. «Una... soluzione del problema potrebbe essere la seguente. I corpi isolati A, B, C... hanno un valore trascurabile nella determinazione del moto del corpo K, che è invece riferito al mezzo nel quale K si trova. Il mezzo, dunque, eserciterebbe la stessa funzione dello spazio assoluto newtoniano» [*ibid.*, p. 248]. Secondo Mach, solo gli esperimenti possono decidere se questo punto di vista è corretto oppure no. Ma tutti gli esperimenti ideati nel secolo scorso – piú importante di tutti il celebre esperimento di Michelson e Morley – per mettere in evidenza il moto della Terra rispetto all'etere mostrano che ciò non è possibile. Se l'etere esisteva, le sue proprietà non potevano essere quelle di un fluido meccanico (materiale).

È a seguito dello sviluppo dell'elettromagnetismo, ad opera soprattutto di Faraday e di Maxwell, che si afferma la nozione di «campo» già implicita, come è stato accennato, nelle equazioni di Laplace e di Poisson per il potenziale gravitazionale. A mio giudizio è storicamente necessario riconoscere che

ciò è stato reso possibile dalla revisione critica dei fondamenti della geometria avvenuta nella prima metà del secolo scorso, ad opera soprattutto di Gauss, Bolyai, Lobačevskij e, piú tardi, Riemann, la quale ebbe nel secolo XVIII un pioniere nel gesuita italiano Saccheri.

Invero, finché l'unica geometria possibile era quella euclidea, era difficile attribuire allo spazio particolari proprietà. Lo spazio euclideo, omogeneo, uniforme, è per sua natura assoluto, indifferenziato; di conseguenza lo spazio «fisico» nel quale rappresentiamo le «cose», gli oggetti della nostra esperienza – finché si supponeva avesse le proprietà geometriche dello spazio euclideo, il solo conosciuto – era una specie di schermo amorfo, sul quale si proiettava la realtà, ma non interveniva a determinare la realtà stessa o, se si preferisce, la sua rappresentazione. Ma con l'avvento delle geometrie non-euclidee, lo spazio geometrico acquista proprietà differenzianti e quindi cessa di essere assoluto; parallelamente diviene non impensabile attribuire proprietà sperimentalmente differenziate anche allo spazio fisico «vuoto».

In tal modo la nozione di «campo», cioè di spazio vuoto di materia, ma ciò nonostante dotato di proprietà fisiche, che possono essere messe in evidenza attraverso l'osservazione del moto dei corpi e dei fenomeni luminosi veniva a fornire quel mezzo «immateriale», che Newton trovava indispensabile per spiegare o, meglio, rappresentare le interazioni elementari. Continuare a chiamare «etere» questo «mezzo», al quale non si poteva attribuire nessuna delle proprietà dei mezzi materiali ordinari, diveniva ormai una pura finzione semantica priva di qualunque utilità e, pertanto, l'uso della parola fu rapidamente abbandonato dalla fisica del XX secolo. Era la fine del «meccanicismo» inteso non già come contrapposto a una interpretazione metafisica della realtà, ma come uno schema rigido, basato su una generalizzazione prematura dell'esperienza immediata. La nuova concezione della realtà fisica, fondata su un «relativismo» di stampo berkeleyano doveva rivelarsi di una fecondità straordinaria.

Parte essenziale di questa nuova «filosofia naturale» sarà d'ora in poi la necessità di definire «operazionalmente» i concetti. Per definire il tempo, lo spazio, il campo gravitazionale, ecc. non basta riferirsi a nozioni vaghe e intuitive, occorre indicare le operazioni, i procedimenti sperimentali necessari per misurarli, cioè per esprimere numericamente le relazioni tra le cose, o meglio tra gli «eventi», che corrispondono a quei concetti. Inversamente queste operazioni sono sufficienti a stabilirne il significato, vale a dire fissano in modo univoco le regole sintattiche per l'uso corretto delle parole nel linguaggio scientifico, senza riferimenti a idee a priori o, comunque, a nozioni non sperimentabili.

5. *La teoria della relatività.*

Per ciò che riguarda la gravità questo ideale è realizzato dalla teoria di Einstein. La teoria della relatività «speciale» (o ristretta) non è ancora una

teoria del campo gravitazionale, ma si riferisce alla nozione di «contemporaneità», il cui valore assoluto è dato per scontato da tutti, fisici e filosofi, prima di Einstein; la critica di un concetto tanto fondamentale suscitò uno scandalo non meno grave dello scandalo suscitato dall'affermazione del moto della Terra.

«Per attribuire un significato fisico al concetto di tempo, si richiedono processi che permettano di stabilire delle relazioni fra posti differenti. Non ha importanza quali tipi di processi si scelgano per tale definizione del tempo, ma è teoricamente vantaggioso scegliere soltanto quei processi sui quali si conosca qualcosa di sicuro. Ciò avviene per la propagazione della luce nel vuoto in misura maggiore che per qualunque altro processo, grazie alle indagini di Maxwell e di Lorentz» [Einstein 1922, trad. it. p. 28].

Questa è la novità introdotta da Einstein: le misure di tempo e di spazio dipendono dalla possibilità di inviare segnali «fisici» da un luogo all'altro e – come si vedrà tra poco – dalla circostanza che la velocità di questi segnali non può superare la velocità della luce. La conseguenza è che la differenza dt tra i tempi e la distanza dl tra i luoghi in cui si svolgono due eventi A e B dipendono, oltre che da questi, anche dall'osservatore che effettua le misure. Due osservatori in moto uno rispetto all'altro otterranno valori differenti per queste grandezze, pur impiegando per la misura gli stessi campioni di durata e di distanza. In particolare può accadere che un certo osservatore trovi $dt=0$, cioè che A e B siano contemporanei, mentre altri osservatori trovino $dt\neq 0$, cioè che A preceda B o viceversa.

Prima di Einstein era stato sempre assunto, piú o meno esplicitamente, che se dt era nullo per un dato osservatore, doveva essere nullo anche per qualunque altro osservatore, indipendentemente dalla posizione e dal moto di questo. Neppure Mach aveva pensato a una possibilità diversa. Mostrando che il confronto tra i valori ottenuti per dt da due osservatori in moto relativo dipende dalla possibilità che essi hanno di scambiarsi segnali, Einstein conclude che la contemporaneità di due eventi è un concetto relativo a chi li osserva e non intrinseco ad essi.

Ma la teoria della relatività non si limita a constatare che dt e dl dipendono dall'osservatore che effettua le misure; essa afferma che le differenze tra le misure da parte di osservatori diversi sono tali che la combinazione

$$ds^2=c^2dt^2-dl^2,$$

dove c indica la velocità della luce, deve avere sempre lo stesso valore per tutti gli osservatori, quali che siano i valori separati dt e dl che essi trovano – purché naturalmente impieghino gli stessi campioni di lunghezza e di tempo (per esempio, il metro e il secondo).

La grandezza ds cosí definita è chiamata «intervallo» (tra gli eventi A e B). Secondo la fisica einsteiniana, tempi e distanze sono, dunque, «relativi», ma l'intervallo è «assoluto», nel senso che dipende solo dagli eventi considerati A e B, ma non dal particolare osservatore.

La situazione è analoga alla misura della distanza tra due punti di un piano; se in un sistema cartesiano le differenze tra le coordinate di due punti sono dx e dy, la loro distanza è data per il teorema di Pitagora da

$$dr^2=dx^2+dy^2.$$

Se, ora, si fanno ruotare gli assi, in generale dx e dy variano, ma dr rimane sempre la stessa, perché la distanza tra i punti dipende da questi, ma non dal sistema di coordinate.

A parte il segno di dl^2, le espressioni di ds^2 e di dr^2 risultano identiche se $x=ct$ e $y=l$. La variazione delle distanze e dei tempi nel passare da un osservatore a un altro è, quindi, analoga alla rotazione di un sistema di coordinate. Ma questa è molto piú che una semplice analogia: i due concetti di «spazio» e di «tempo», che finora erano stati considerati come nettamente distinti, vengono ora fusi in un unico «continuo», in cui entrano elementi dell'uno e dell'altro. In relatività le nozioni fondamentali non sono quelle di spazio e di tempo, ma quella di spazio-tempo o, come talora si usa dire, di universo; la velocità della luce c non è altro che un fattore che deriva dalla circostanza che noi misuriamo le lunghezze in metri (o chilometri) e i tempi in secondi (o anni), ma in realtà noi potremmo benissimo misurare anche i tempi in metri. Il moto di un corpo è rappresentato dalla sua «linea d'universo», cioè dalla sua traiettoria spaziale, insieme con la legge temporale con cui questa è percorsa dal corpo; essa è formata da una successione di «eventi»: il successivo passaggio del corpo attraverso vari punti dello spazio.

La differenza nel segno del secondo termine a secondo membro nelle espressioni di ds^2 e di dr^2 ha un importante significato fisico. La velocità di un corpo che percorre, rispetto a un certo osservatore, la distanza dl nel tempo dt è – rispetto allo stesso osservatore – $v=dl/dt$. Perciò l'intervallo tra la partenza e l'arrivo – che deve essere uguale per tutti gli osservatori – è dato da

$$ds^2=\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)c^2\,dt^2,$$

da cui risulta che $ds^2>0$, se $v<c$, $ds^2=0$, se $v=c$ (cioè se il corpo si muove con la velocità della luce) e $ds^2<0$, se $v>c$; ma questo ultimo caso si deve escludere, se si vuole che le grandezze fisiche siano espresse da numeri reali, perché se $ds^2<0$, ds è immaginario.

Questa è la «spiegazione», secondo la teoria della relatività, del fatto che nessun segnale fisico può viaggiare con una velocità superiore a quella della luce. Inoltre, se $v=c$, cioè se $ds=0$ per un osservatore qualunque, deve esserlo per ogni altro osservatore; cioè se un corpo viaggia rispetto a un osservatore qualunque con la velocità della luce, si muove con la stessa velocità rispetto a qualunque altro osservatore. Naturalmente questo non è che un modo conveniente per tradurre in «legge» il fatto che tutti gli esperimenti finora effettuati per mettere in evidenza il moto della Terra rispetto all'etere hanno dato un esito negativo e non è per nulla una «verità evidente» in senso cartesiano.

Lo spazio-tempo è un continuo a quattro dimensioni, cioè si richiedono quattro coordinate per localizzare un evento, perché il «tempo» ha una di-

mensione (prima ⇒ dopo) e lo «spazio» ne ha tre (avanti ⇒ dietro, sinistra ⇒ destra, basso ⇒ alto). Se, perciò, indichiamo con x, y, z le tre coordinate spaziali in un sistema cartesiano – cioè rispetto a un certo osservatore – l'espressione completa dell'intervallo secondo la teoria della relatività è

$$ds^2 = c^2dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

Questo corrisponde a quello che si chiama uno «spazio-tempo pseudoeuclideo» o anche «minkowskiano» (da Minkowski); in uno spazio-tempo minkowskiano lo «spazio» (rispetto a qualunque osservatore) è ancora euclideo.

Questa lunga premessa era indispensabile, perché il concetto di intervallo domina tutta la teoria della relatività ed è fondamentale per comprendere la nozione moderna di campo gravitazionale. Dal punto di vista interpretativo-sperimentale, questa nozione prende le mosse dal «principio di equivalenza», che Einstein deriva dalla critica machiana.

La discussione di Mach aveva mostrato che un moto non uniforme è equivalente a un campo di forza. Un osservatore in quiete rispetto alle stelle fisse «spiega» il fatto che la superficie dell'acqua nel secchio non è piana dicendo che il secchio con l'acqua ruota e ciò dà luogo alla forza centrifuga che spinge l'acqua verso il bordo del secchio; un osservatore che ruota insieme con il secchio (ma non sa di ruotare) «spiega» lo stesso fatto affermando che le stelle «fisse» ruotano intorno all'asse del secchio, che resta immobile, ma esiste anche un misterioso campo di forza (di origine sconosciuta) che agisce ugualmente su tutti i corpi contenuti nel secchio. Chi dei due ha ragione? Secondo Mach, non c'è ragione di preferire una spiegazione all'altra. Dire che il secchio ruota (rispetto alle stelle fisse) o dire che esiste una forza che spinge i corpi verso il bordo del secchio non sono in realtà due spiegazioni diverse, ma solo due modi differenti di descrivere quello che accade nell'interno del secchio e che i greci avrebbero espresso dicendo che i corpi che stanno nel secchio hanno una «simpatia» per il bordo.

A tutto rigore l'enunciato: «La Terra gira e il Firmamento è immobile» non è piú vero dell'enunciato opposto: «La Terra è immobile e il Firmamento ruota»; ma il secondo enunciato è piú «scomodo» perché obbliga a introdurre misteriosi campi di forza per spiegare le osservazioni. Il sistema tolemaico non è «falso», è inutilmente complicato. Paradossalmente, la posizione di Osiander che la teoria copernicana era una (utile) «ipotesi» matematica viene ripresa, sia pure con tutt'altro significato, dalla scienza moderna.

Questa equivalenza delle due «spiegazioni» è possibile solo perché l'effetto della rotazione è identico su tutti i corpi, indipendentemente dalla loro massa e dalla loro composizione chimica, e lo stesso vale anche per la gravità, altrimenti la differenza sarebbe osservabile. L'equivalenza si può applicare alla gravità, ma non al campo elettromagnetico o alle forze nucleari; infatti, come si può affermare che in un certo luogo esiste un campo elettrico? osservando che certi corpi – detti per questo elettricamente carichi – si comportano differentemente da altri. Ma questa differenza di comportamento è esclusa sia per la gravità che per altre forze «inerziali», come la forza centrifuga; quindi per

constatare la presenza di un campo gravitazionale è necessario confrontare il comportamento di un corpo in due regioni diverse. Anzi – d'accordo con Berkeley – non basta un corpo, ma ne occorrono due, per osservare il moto relativo.

In tal modo, però, si giunge alla conclusione che queste differenze – che noi interpretiamo come una manifestazione del campo – sono una proprietà non dei corpi, ma dello spazio-tempo; perciò si devono poter descrivere mediante il concetto d'intervallo. Ma come?

L'intervallo dello spazio-tempo della relatività speciale, che già conosciamo, corrisponde a uno spazio euclideo e a uno spazio-tempo minkowskiano o pseudoeuclideo. Esso è completamente rigido e non lascia alcuna possibilità di differenziare un punto dall'altro. Occorre perciò una generalizzazione dell'intervallo, che consenta di descrivere, se necessario, spazi non-euclidei e spazio-tempi non-minkowskiani. Tale generalizzazione era già conosciuta al tempo di Einstein, grazie agli sviluppi della geometria differenziale, dovuti all'opera di Gauss e di Riemann e, dopo di loro, di Christoffel, Bianchi, Ricci-Curbastro, Levi-Civita e altri grandi matematici della fine del XIX e della prima metà del XX secolo. Essa consiste nell'assumere come espressione dell'intervallo, invece della somma dei quadrati dei differenziali del tempo e delle coordinate spaziali, la forma quadratica generale

$$ds^2 = \sum_{i,k=1}^{4} g_{ik} dx^i dz^k.$$

dove le grandezze g_{ik} sono funzioni del punto (cioè delle coordinate x^i); gli indici alle coordinate sono stati scritti in alto (indici controvarianti) per uniformarsi all'uso.

Un continuo il cui intervallo ha questa espressione piú generale si chiama «spazio riemanniano». Evidentemente, se $x^1 = ct$, $x^2 = x$, $x^3 = y$, $x^4 = z$ e

$$g_{11} = c^2 \qquad g_{22} = g_{33} = g_{44} = -1$$
$$g_{ik} = 0 \qquad \text{se } i \neq k,$$

l'intervallo cosí definito diviene identico a quello di uno spazio-tempo minkowskiano, che è quindi un caso particolare di uno spazio riemanniano (a quattro dimensioni).

Per associare questi concetti geometrici alla gravità e al moto dei corpi si fa ora l'ipotesi che la «linea d'universo» di un corpo non soggetto a forze (diverse dalla gravità) non possa essere una linea qualunque, ma appartenga a una classe particolare di linee dello spazio-tempo definite in modo univoco dall'intervallo, cioè dalle funzioni g_{ik}. Con questa «geometrizzazione» della gravità si traduce in linguaggio matematico il principio di equivalenza: la gravità non è piú una «forza», ma la geometria dello spazio-tempo.

È chiaro che cosí: *a*) le leggi del moto dei corpi non soggetti a forze diverse dalla gravità o da altre forze inerziali sono determinate dalla scelta di quella classe di linee che corrispondono alle linee d'universo dei corpi stessi; *b*) i coefficienti g_{ik} determinano la rappresentazione geometrica del campo gravitazionale e dovranno essere associati alle masse mediante un sistema di equa-

zioni che costituiscono l'analogo della legge di Poisson della teoria classica.

La classe di linee scelte da Einstein (e la piú naturale) per rappresentare il moto dei corpi è quella delle cosiddette «geodetiche». Queste linee sono definite in modo tale che misurando l'intervallo tra due eventi A e B lungo la geodetica che li unisce – che in generale è una e solo una – esso risulta minore dell'intervallo misurato lungo qualunque altra linea d'universo che si può condurre da A a B

$$\int_{A\,(\text{Geodetica})}^{B} ds \leq \int_{A}^{B} ds,$$

precisamente come nello spazio euclideo (ordinario) la minima distanza tra due punti è quella misurata lungo la retta che li unisce.

Per esempio, nel caso dello spazio-tempo minkowskiano – che corrisponde a un luogo lontano da ogni massa – le geodetiche sono linee rette percorse con velocità costante (legge d'inerzia). Vicino a una massa S i coefficienti g_{ik} devono essere tali che le linee d'universo dei corpi che cadono direttamente su S siano rette percorse con moto uniformemente accelerato (se il tratto percorso non è troppo lungo); piú in generale il moto dei corpi nelle vicinanze di S deve risultare, almeno in prima approssimazione, conforme alle leggi di Keplero.

In tal modo la legge d'inerzia, le leggi di Keplero e la legge galileiana dell'indipendenza del moto di caduta dalla massa del corpo che cade vengono incorporate in un'unica formulazione geometrica. Ciò dimostra il grande progresso concettuale della nuova meccanica rispetto a quella classica newtoniano-galileiana.

Vi sono due modi possibili di associare questa formulazione geometrica ai concetti tradizionali di forza, massa, ecc. Il primo consiste nell'affermare che l'esistenza di una massa S determina la geometria dello spazio-tempo nel modo descritto dalle funzioni g_{ik} corrispondenti al valore della massa e al punto che essa occupa, e la modificazione della geometria rispetto a quella di uno spazio-tempo minkowskiano equivale a un campo di forza che agisce ugualmente su tutti i corpi e dà luogo ai loro moti. Il secondo consiste nel considerare i concetti di «massa», «forza», «inerzia», ecc. solo come termini tradizionali utili per descrivere certe proprietà geometriche dello spazio-tempo, le quali costituiscono la «vera realtà fisica».

Ovviamente si tratta solo di una differenza tra due modi di esprimersi; la «realtà» è costituita dai corpi e dai loro moti, cosí come vengono osservati; il resto è un modo conveniente di esprimere il fatto che questi moti sono quello che sono; oltre che per esprimersi correttamente, la descrizione geometrica del campo è utile perché consente una buona previsione dei moti. E questo è tutto.

D'altronde questo relativismo integrale corrisponde precisamente alle operazioni fisiche che permettono di stabilire l'esistenza di masse in una certa regione dell'universo. Per determinare la massa di una stella o di una galassia, gli astronomi osservano i moti dei corpi – stelle o galassie – nei paraggi e da

questi deducono il valore delle masse necessarie a «spiegare» i moti stessi, cioè il fatto che non sono rettilinei e uniformi. Non di rado la scoperta delle masse e la determinazione della loro posizione ha preceduto l'osservazione dei corpi cui sono associate, come è avvenuto per la scoperta di Nettuno o del satellite di Sirio. Il fatto che normalmente le masse sono anche visibili sotto forma di «corpi» si deve alla circostanza che lo spazio occupato da esse è anche sede di cariche elettriche (e di altre proprietà fisiche); le «particelle elementari» non sono unicamente portatrici di massa, ma anche di carica elettrica, momento rotazionale, ecc.

Naturalmente per assegnare un valore alle masse – nonché le loro posizioni – non bastano le leggi del moto, ma occorre associare i coefficienti g_{ik} della metrica alle masse stesse. Occorrono cioè delle «equazioni gravitazionali», la cui forma classica (newtoniana) è la legge di Poisson, che è sufficiente per la maggior parte dei problemi astronomici. Una forma, ritenuta migliore, delle equazioni del campo gravitazionale, conforme alle idee esposte sopra, è quella datane da Einstein nella sua teoria generale della relatività (che non riteniamo necessario riprodurre); ma malgrado la formulazione einsteiniana susciti una impressione molto soddisfacente per la sua eleganza e semplicità, è chiaro che anch'essa ha i suoi limiti e che il suo valore dipende dall'accordo con le osservazioni. Molti pensano anzi che le equazioni di Einstein non abbiano una giustificazione adeguata ed esistono già tentativi per giungere a una formulazione migliore; la sola condizione a priori a cui queste «teorie postnewtoniane» devono soddisfare è di riprodurre in prima approssimazione i risultati newtoniani.

Quest'ultima esigenza corrisponde a un aspetto tipico della nuova metodologia scientifica. Una teoria nuova non è pensata come qualcosa che si contrappone alle teorie che la hanno preceduta, escludendole in quanto «false», ma piuttosto come una loro continuazione e precisazione nel senso di una approssimazione migliore, spesso richiesta da osservazioni piú esatte. Questo riconoscimento della validità permanente di una teoria scientifica, immaginata per rappresentare i fatti conosciuti in un certo momento storico (e non una «realtà» assoluta), acquista il valore di un principio metodologico: il principio di corrispondenza.

Questo «principio» stabilisce che ogni nuova teoria deve riprodurre i risultati delle teorie precedenti (classiche) entro i limiti di precisione degli esperimenti su cui quelle teorie erano state fondate. Per esempio, le previsioni della «nuova» meccanica atomica (quantistica) devono coincidere con quelle basate sulla meccanica e l'elettromagnetismo classici in tutti quei casi in cui le quantità di energia che un sistema atomico scambia con la radiazione elettromagnetica – nei fenomeni di assorbimento e di emissione di luce – sono molto piccole rispetto all'energia totale del sistema. La teoria della relatività speciale e la meccanica galileiano-newtoniana conducono agli stessi risultati in tutti i casi in cui le velocità dei corpi sono piccole rispetto alla velocità della luce. I risultati della teoria della relatività generale sono identici ai risultati della teoria della gravità di Newton, quando da un lato le velocità dei corpi

sono piccole rispetto a quella della luce e dall'altro il campo gravitazionale è debole nel senso che sarà precisato nel paragrafo 6.

Ciò può sembrare banale, perché è ovvio che una teoria creata per rappresentare certi fatti sperimentali seguiterà a farlo sempre, ma possiede invece un significato profondo: qualunque teoria fisica (classica o moderna) vale solo in relazione con dei fatti sperimentali. Il fatto che essa impieghi certi schemi (dinamici o geometrici, causali o probabilistici) invece di altri non è essenziale. Se gli esperimenti si fanno piú raffinati, potranno rendersi necessari schemi mentali nuovi, che consentano previsioni piú precise, ma ciò non significa che i vecchi schemi siano da rigettare; al contrario essi saranno sempre utili, sia perché le nuove teorie sono generalmente piú complicate nelle applicazioni e sia perché l'abitudine ha reso i concetti classici piú chiari all'intuizione. Anche dopo l'avvento della teoria della relatività, gli astronomi continuano a impiegare la legge di Newton in quasi tutti i loro problemi; la terminologia espressiva tradizionale di «masse», «forze», «potenziali», ecc. continua ad essere indispensabile per le applicazioni ad altri rami della fisica, dell'astrofisica e alla cosmologia.

La sola cosa essenziale è non confondere gli schemi mentali con la «realtà», sulla quale la fisica non ha molto da dire.

6. *Conferme sperimentali.*

6.1. Il principio di equivalenza.

Nell'epoca pre-relativistica la piú importante esperienza di laboratorio relativa alla gravità è il celebre esperimento di Cavendish [1798] per la determinazione della costante universale G. Il risultato moderno dà: $G = 6{,}674 \times \times 10^{-8}$ cm^3 sec^{-2} grammo^{-1}, con un errore inferiore a 0,7 per mille.

In un certo senso l'esperienza quotidiana che i gravi cadono, l'osservazione del moto dei corpi celesti e via dicendo sono altrettante «prove» della teoria della gravitazione; ma noi vogliamo ora soffermarci su quegli esperimenti che sono direttamente collegati con le idee illustrate nell'ultimo paragrafo.

Le verifiche possibili si dividono in due categorie: quelle che si riferiscono al principio di equivalenza, cioè alla «geometrizzazione» della gravità che consiste nell'assumere come linea d'universo di un corpo non soggetto a forze diverse dalla gravità una geodetica di uno spazio riemanniano (a quattro dimensioni); e quelle che si riferiscono alle equazioni del campo gravitazionale, cioè alle particolari equazioni che associano le grandezze fisiche (masse, energie, ecc.) ai coefficienti g_{ik} dell'intervallo. Tra queste le equazioni di Einstein della teoria generale della relatività occupano il posto principale, ma non sono a priori le uniche possibili.

Il principio di equivalenza è stato verificato con enorme precisione mediante l'esperimento di Eötvös, ripetuto recentemente da altri fisici; questo esperimento è la dimostrazione sperimentale dell'affermazione galileiana che

l'accelerazione dovuta alla gravità è identica per tutti i corpi e dimostra la straordinaria validità dello schema geometrico.

L'idea dell'esperimento di Eötvös è semplice, anche se la sua realizzazione con una precisione cosí elevata pone problemi tecnici di grandissima difficoltà. La verticale in un punto qualunque della superficie terrestre – rappresentata, per esempio, dalla direzione del filo a piombo – è definita dalla risultante di due forze: la gravità (locale) e la forza centrifuga dovuta alla rotazione terrestre. In realtà vi sono anche altre forze non trascurabili, come quella dovuta all'attrazione del Sole, ma per una descrizione elementare dell'esperimento esse possono essere ignorate. La forza centrifuga è, per definizione, una forza «inerziale», cioè proporzionale alla massa (inerte) di qualunque corpo; se la gravità non fosse anch'essa proporzionale alla massa, ma a un altro parametro, che potremmo chiamare «massa gravitazionale» – tanto per distinguerlo dalla massa ordinaria o inerte – le forze risultanti che agiscono su due masse di natura e grandezza differenti, A e B, dovrebbero avere direzioni diverse. In altre parole, se il principio di equivalenza non fosse valido in natura, le verticali definite da due masse diverse A e B nello stesso luogo dovrebbero divergere.

In tal caso, se le masse A e B sono fissate alle estremità di un braccio rigido diretto da est a ovest (cfr. fig. 1) e sospeso a un filo in posizione orizzontale, la componente orizzontale della coppia dovuta alla differenza tra le due verticali dovrebbe tendere a far ruotare il braccio, fino a che l'elasticità di torsione del filo a cui è sospeso non ristabilisca l'equilibrio. Determinata allora con la maggior precisione possibile la posizione di equilibrio del braccio, si fa ruotare di 180° intorno alla verticale – non importa se di A o di B – la testa di sospensione del filo. Con ciò si invertono le posizioni delle masse A e B e quindi il senso della coppia; se, ora, le verticali non coincidono, si dovrà per conseguenza trovare che il braccio non ha ruotato di 180°, ma di un angolo leggermente diverso da quello di cui è stata fatta ruotare la testa.

L'esperimento, ripetuto da Eötvös un grande numero di volte, con masse di grandezza e di materiali diversi, ha dato sempre esito negativo: il braccio ruotava sempre di un angolo uguale a quello della testa di sospensione, mostrando cosí che le direzioni delle verticali di A e di B erano assolutamente identiche. Se la massa gravitazionale fosse stata diversa dalla massa inerte solo di una parte su 10^8 (100 milioni, 1 grammo su 100 tonnellate!) l'esperimento sarebbe stato in grado di rivelare l'esistenza della coppia dovuta alla differenza tra le due verticali.

Al principio degli anni '60 l'esperimento fu ripetuto da Dicke e dai suoi collaboratori – con alcune modifiche concettualmente inessenziali – e poco dopo anche da Braginsky e collaboratori. In questi esperimenti la precisione era 1000 volte superiore a quella raggiunta da Eötvös, sicché il principio di equivalenza è forse la legge fisica verificata con maggior precisione.

L'esperimento descritto si riferisce ai fenomeni meccanici (principio di equivalenza «debole»), ma è stato provato – seppure finora con precisione minore – che l'equivalenza vale anche per i fenomeni elettromagnetici (principio di equi-

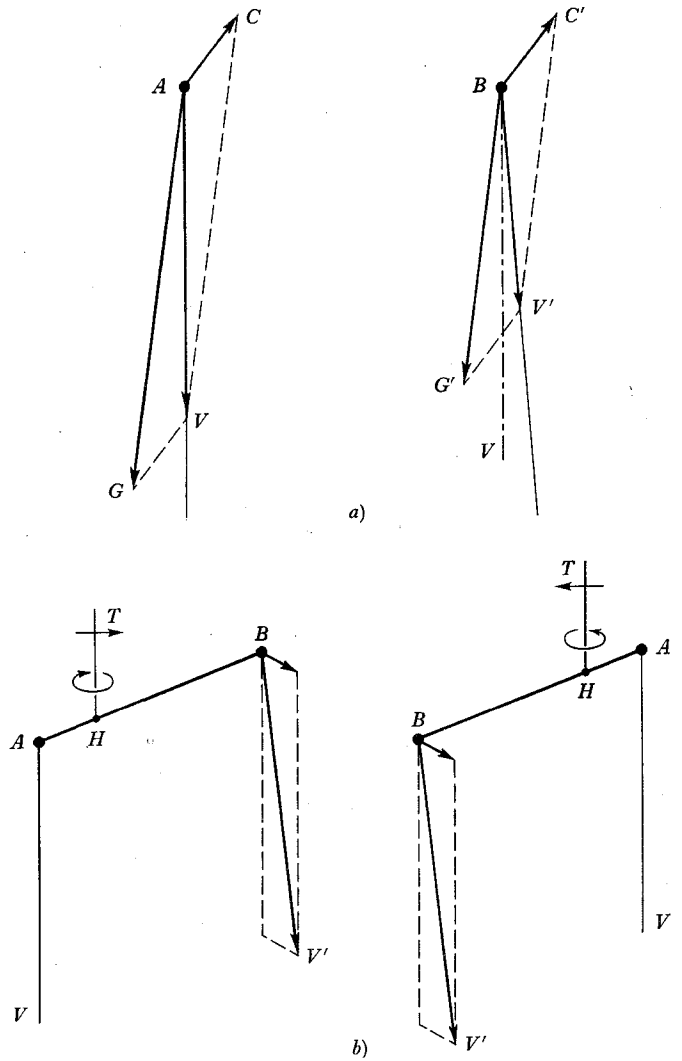


Figura 1.

a) Se le due masse A e B hanno la stessa massa inerte, ma massa gravitazionale differente, le forze centrifughe dovute alla rotazione terrestre AC e BC' sono uguali e parallele, mentre le forze di gravità AG e BG', pur essendo parallele, non sono uguali; perciò le verticali AV e BV' formano un certo angolo tra loro, cioè non sono parallele.

b) (Esperimento di Eötvös) Le due masse A e B sono ora fissate agli estremi di un braccio rigido sospeso a un filo TH. Se le due verticali AV e BV' non sono parallele, la componente di BV' perpendicolare ad AV genera una coppia che tende a far ruotare il braccio; se si gira di 180° la testa di sospensione T, si inverte la posizione delle due masse A e B e quindi il senso della coppia. Nella nuova posizione l'equilibrio tra la coppia e la torsione del filo si raggiunge, perciò, quando il braccio si è girato di un angolo diverso da quello di cui è stata girata la testa. L'esito negativo di questo esperimento mostra che la massa inerte e la massa gravitazionale sono perfettamente uguali.

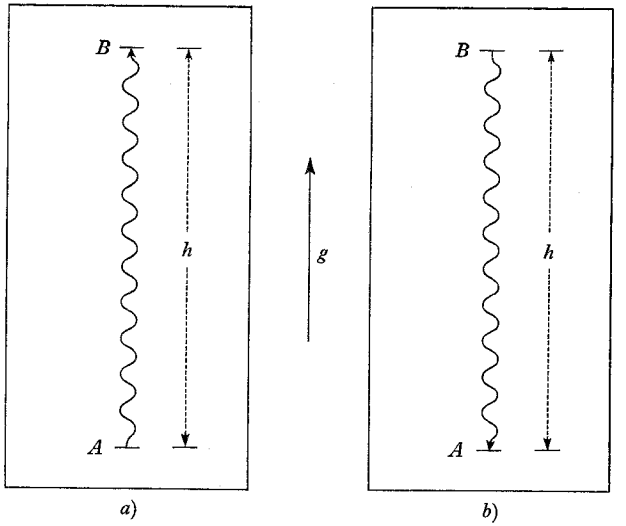


Figura 2.

La figura mostra una capsula spaziale accelerata «rispetto alle stelle fisse» come indicato da g in due fasi dell'esperimento; A e B sono due maser a idrogeno perfettamente uguali. In *a*) il segnale partito da A giunge a B dopo un tempo h/c, quando la velocità della capsula è aumentata; quindi sembra che B si allontani da A con la velocità gh/c e per effetto Doppler la frequenza di A risulta minore di quella di B. In *b*) il segnale parte da B e giunge ad A dopo il tempo h/c; sembra perciò che A si avvicini a B con la velocità gh/c e la frequenza di B risulta maggiore di quella di A. In ambedue i casi l'effetto è lo stesso: la frequenza di A è minore di quella di B. Un osservatore nell'interno della capsula, che vede restare costante la distanza tra A e B, giudica che gli orologi vicini ad A sono piú lenti di quelli vicini a B; se non è al corrente che la capsula è accelerata, deve attribuire la differenza a un campo di forza.

valenza «forte»). È istruttivo descrivere l'esperimento 'ideale' che consente di giungere a questa conclusione, verificata poi in pratica.

Si immagini (cfr. fig. 2) una capsula spaziale in moto accelerato rispetto «alle stelle fisse» (per usare l'espressione di Mach) e sia g l'accelerazione che supponiamo diretta secondo la freccia. Nell'interno della capsula, nei punti A e B alla distanza h nella direzione dell'accelerazione, si trovano due «orologi» perfettamente identici: per esempio, due maser a idrogeno. Un osservatore nell'interno della capsula deve, tuttavia, notare una certa differenza nell'andamento dei due orologi a causa dell'accelerazione; infatti nel tempo che un segnale luminoso (l'emissione dei maser) si propaga da A a B o da B ad A, la velocità della capsula è aumentata di una quantità

$$\text{tempo} \times \text{accelerazione} = \frac{h}{c} g,$$

e, perciò, la velocità del punto di arrivo è maggiore di quella del punto di partenza del segnale; se il segnale parte da A, sarà come se i due punti si allontanassero l'uno dall'altro, mentre se il segnale parte da B, sarà come se essi si avvicinassero, in tutti e due i casi con la velocità relativa hg/c. In realtà il moto (relativo) è solo apparente e si deve al fatto che la velocità del segnale non è infinita e perciò l'istante di arrivo del segnale non coincide con quello di partenza, ma lo segue; la distanza tra i due punti non cambia, ma la frequenza del maser in A deve sembrare piú bassa di quella del maser in B, per effetto Doppler, come se la velocità relativa fosse reale. Se f è la frequenza (indisturbata) dei maser e Δf indica la differenza dovuta all'effetto dell'accelerazione, si ha, cosí

$$\frac{\Delta f}{f}=\frac{hg}{c^2}.$$

Si noti che il prodotto di g per h è il lavoro di una forza g su un punto che si muove su una distanza h, cioè la «differenza di potenziale» tra A e B.

Secondo il punto di vista newtoniano, questo esperimento è paragonabile all'esperimento del secchio rotante; dovrebbe consentire di mettere in evidenza l'accelerazione (assoluta) della capsula con un esperimento eseguito unicamente all'interno di essa. Secondo il punto di vista di Mach, un campo di forza (gravitazionale) che produce la stessa differenza di potenziale dovrebbe avere lo stesso effetto sulle frequenze dei due maser (e di qualunque altro orologio). Le righe spettrali generate in un punto A dove il campo è piú forte, devono avere una frequenza minore di quelle generate da un sistema atomico identico situato in B; la variazione della frequenza deve essere proporzionale alla differenza di potenziale tra i due punti. «Io senza esperienza» avrebbe detto Galileo «son sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perché cosí è necessario che segua!»

In realtà esistono varie conferme sperimentali di questo che è chiamato talora «effetto Einstein» o «spostamento gravitazionale delle righe spettrali»; in qualche testo esso è considerato come una delle tre prove «cruciali» della teoria della relatività; in realtà è solo una prova del principio di equivalenza (forte). Il campo gravitazionale alla superficie del Sole è maggiore che alla superficie della Terra; perciò le righe spettrali del Sole devono avere una frequenza minore di quella di sorgenti terrestri identiche. La differenza è di appena 0,0002 per cento, ma pur essendo cosí piccola è perfettamente misurabile; i movimenti dei gas che formano l'atmosfera solare e le differenze di profondità a cui si formano le diverse righe spettrali rendono però le misure alquanto incerte. L'effetto è un centinaio di volte maggiore nel caso di alcune stelle di enorme densità («nane bianche»), come il satellite di Sirio; in questi casi le previsioni teoriche sono confermate entro i limiti imposti dagli errori d'osservazione, che peraltro sono piuttosto elevati: circa il 10 per cento dell'effetto che si vuole osservare.

La verifica piú precisa è stata eseguita nel giugno 1976 mediante una sonda lanciata dalle isole Wallops, recante a bordo un maser a idrogeno. I segnali

raccolti durante circa un'ora intorno all'apogeo, a un'altezza di circa 10000 km, e confrontati con due maser della stazione d'osservazione rivelano un accordo tra teoria e osservazione entro lo 0,02 per cento dell'effetto previsto [cfr. Vessot e Levine 1976, p. 371].

In conclusione, si può affermare che il principio di equivalenza è stato verificato con un grado elevatissimo di precisione (una parte su 10^{11}) per i fenomeni meccanici e con precisione soddisfacente, anche se alquanto minore (una parte su 5000) per i fenomeni elettromagnetici. Può essere interessante osservare che l'esperimento delle isole Wallops coinvolge anche le forze nucleari, perché la radiazione di un maser a idrogeno si deve alla struttura iperfina degli stati energetici dell'atomo di idrogeno, cioè all'interazione tra i momenti magnetici dell'elettrone e del protone; quest'ultimo a sua volta è legato all'interazione nucleare e quindi un effetto del campo gravitazionale sulle forze nucleari dovrebbe modificare la frequenza della radiazione del maser.

6.2. Teorie postnewtoniane.

Per distinguere tra loro le possibili teorie del campo gravitazionale basate sulla geometrizzazione della gravitazione, si è trovato utile servirsi della seguente rappresentazione parametrica. In generale per queste teorie, nel caso del campo gravitazionale esterno a una massa sferica M a una distanza r dal centro, risolvendo le equazioni del campo, si trova che i coefficienti g_{ik} si possono calcolare come la somma di potenze della grandezza numerica

$$q=\frac{GM}{c^2r}.$$

Questa quantità è sempre piccola; per esempio, per il campo solare alla distanza della Terra si ha $M=1{,}99\times10^{33}$ grammi, $r=1{,}495\times10^{13}$ cm, ed essendo $G=6{,}67\times10^{-8}$ (in queste unità), viene $q=0{,}988\times10^{-8}$; anche alla superficie del Sole, dove $r=6{,}96\times10^{10}$ cm, $q=2{,}12\times10^{-6}$, ogni termine della somma è appena 1/400 000 del termine che lo precede e perfino alla superficie del satellite di Sirio il rapporto tra due termini consecutivi è inferiore a 1/4000.

Perciò in tutti i casi in cui si può pensare a una verifica sperimentale si può limitarsi a prendere in considerazione solo i primi termini della somma. In altre parole in tutte le teorie postnewtoniane, cioè in tutte le teorie che riproducono in prima approssimazione i risultati newtoniani, se $x^1=t$ e le altre tre coordinate corrispondono a un sistema cartesiano, si può assumere, senza errori apprezzabili

$$g_{11}=c^2(1-2q+2\beta q^2+\ldots)$$
$$g_{22}=g_{33}=g_{44}=-(1+2\gamma q+\ldots)$$
$$g_{ik}=0 \qquad \text{se } i\neq k$$

dove i puntini indicano termini che si possono trascurare. I fattori 2 nei termini entro parentesi sono stati scelti in modo tale che i parametri β e γ risul-

tino uguali a 1 per il caso della teoria generale della relatività; deve essere chiaro che a ogni particolare teoria postnewtoniana corrisponde una coppia di valori di β e γ. In linea di principio questi parametri si possono però determinare sperimentalmente mediante l'osservazione di fenomeni meccanici e ottici che si svolgono in un campo gravitazionale; il confronto con i valori teorici consente di eliminare quelle teorie per cui si trova una differenza rispetto ai valori osservati maggiore di quanto sia ragionevole attendersi in base agli inevitabili errori d'osservazione.

L'effetto postnewtoniano piú noto è lo spostamento del perielio di Mercurio. Secondo la prima legge di Keplero l'orbita di un pianeta è un'ellisse, di cui il Sole occupa un fuoco; ma in realtà, anche nel caso newtoniano, a causa della perturbazione prodotta sul moto dalle masse degli altri pianeti, l'ellisse non si chiude esattamente: le direzioni corrispondenti a due perieli consecutivi formano tra loro un certo angolo ϑ. In altre parole, l'asse dell'ellisse orbitale va ruotando lentamente (rispetto alle stesse fisse) di una quantità che si può calcolare molto esattamente, se si conoscono le masse e le posizioni di tutti i pianeti; il risultato del calcolo può essere poi messo a confronto con le osservazioni.

Nel caso di Mercurio l'angolo ϑ osservato è di $5'',75$ per anno, mentre le perturbazioni planetarie danno $\vartheta = 5'',32$; rimane cosí un residuo di circa $0'',4$ per anno (esattamente $42'',9$ per secolo) che non può essere spiegato nell'ambito della teoria newtoniana. Attualmente, dopo che la massa di Venere – cui si deve circa la metà del totale delle perturbazioni – è stata determinata con grande precisione mediante l'impiego di sonde spaziali, l'avanzamento del perielio di Mercurio si può considerare conosciuto con una precisione pari a circa lo 0,7 per cento dell'effetto postnewtoniano. Precisamente, secondo le teorie postnewtoniane, un avanzamento del perielio di $42'',9$ per secolo equivale a

$$\frac{2+2\gamma-\beta}{3} = 1{,}005 \pm 0{,}007.$$

Questo valore è compatibile con la teoria di Einstein, che prevede $\gamma = \beta = 1$, $(2+2\gamma-\beta)/3 = 1{,}000$, ma non esclude altre possibilità. Inoltre è possibile, anche se poco probabile, che una distribuzione non esattamente sferica delle masse nell'interno del Sole produca uno spostamento addizionale del perielio di Mercurio, rendendo cosí meno significativo l'accordo con la teoria della relatività.

Naturalmente un effetto analogo esiste anche per gli altri pianeti, ma l'effetto previsto è dello stesso ordine di grandezza degli errori d'osservazione; è stato anche proposto di verificare lo spostamento del perielio mediante apposite sonde spaziali, ma finora nessun esperimento del genere è stato effettuato. Invece molto recentemente (settembre 1978) è stata resa nota un'altra verifica della teoria, basata sulle osservazioni della «pulsar» PSR 1913-16. Attribuendo all'effetto Doppler le variazioni del periodo di questo oggetto, si trova che esso fa parte di un sistema binario avente un periodo di 27 907 s = 0,323 giorni; l'altra componente è un oggetto compatto di massa uguale al Sole, presumibilmente una nana bianca o una stella di neutroni. L'eccentricità dell'orbita è alquanto elevata, 0,617, e ciò consente di determinare con esattezza la posizione del periastro, che è vicina a 180° e nei due anni su cui si estendono le osservazioni ha mostrato un avanzamento di $4°,221 \pm 0{,}002$ all'anno. Questo è esattamente l'avanzamento previsto dalla teoria della relatività con un errore di 1 parte su 2000.

La velocità della luce in un campo gravitazionale non è esattamente c, ma secondo le teorie postnewtoniane è data da $c[1-(1+\gamma)q]$ e quindi varia con r. Ciò dà luogo a due effetti, entrambi osservabili con notevole precisione.

Il primo corrisponde a una curvatura o deflessione di un raggio luminoso nel passare vicino a una massa, come se l'indice di rifrazione dello spazio (vuoto) fosse variabile. Per un raggio che sfiora la superficie solare questa deflessione corrisponde a un angolo $\vartheta = 0'',875(1+\gamma)$ tra la direzione iniziale e quella finale. Questa deflessione si può misurare confrontando le posizioni di stelle vicine al disco solare durante un'eclisse totale di Sole, con quelle delle stesse stelle osservate a distanza dal Sole. I risultati migliori sono stati ottenuti durante gli eclissi del 1947 e del 1952, che hanno dato rispettivamente $\vartheta = 2'',01 \pm 0{,}27$ e $\vartheta = 1'',70 \pm 0{,}10$; la media pesata è $1'',73 \pm 0{,}09$, che corrisponde a $\gamma = 0{,}98 \pm \pm 0{,}10$.

La stessa osservazione si può effettuare impiegando onde radio da sorgenti puntiformi; in questo caso non è necessario aspettare il verificarsi di un'eclisse totale, perché la radioemissione solare non disturba le osservazioni. È invece necessario considerare l'effetto della rifrazione sulle onde radio da parte della corona solare. La media di varie misure interferometriche negli anni 1974 e 1975 [cfr. Sramek e Fomalont 1976, p. 173] ha dato $\vartheta = 1'',762 \pm 0{,}016$, ossia $\gamma = 1{,}014 \pm 0{,}018$.

Il secondo effetto consiste in un ritardo dei tempi eco di segnali radar riflessi dai pianeti e da sonde spaziali, se il segnale passa vicino al Sole. Per un raggio che sfiora la superficie solare, il ritardo è

$$\tau = 250\,\frac{1+\gamma}{2}\,\mu\text{sec}.$$

I risultati ottenuti fino al 1972 (incluso) hanno dato $\gamma = 1{,}00 \pm 0{,}04$ (Shapiro), a cui si possono aggiungere le osservazioni ottenute con le sonde Mariner 6 e Mariner 7, $\gamma = 1{,}00 \pm 0{,}06$.

Combinando i dati ottenuti dalla deflessione e dal ritardo dei segnali, gli effetti che dipendono dalla variazione della velocità della luce nel campo gravitazionale del Sole dànno, per il parametro γ, $\gamma = 1{,}003 \pm 0{,}009$, valore che non solo conferma la teoria di Einstein, ma consente di escludere varie teorie postnewtoniane, tra cui, soprattutto, quella proposta da Brans e Dicke nel 1961, che aveva suscitato notevole interesse.

La tecnologia moderna permette in principio altri importanti esperimenti sulla gravità; tra questi sarà sufficiente accennare a quello che impiega il tem-

po di andata e ritorno di impulsi laser tra una stazione terrestre e i riflettori collocati dagli astronauti sulla superficie lunare. Con questi esperimenti la posizione relativa della stazione terrestre e del riflettore sulla Luna può essere misurata con una precisione di circa 25 cm (su 380 000 chilometri, una parte su un miliardo e mezzo). Lo scopo principale di questo esperimento è di verificare se i corpi celesti si muovono veramente lungo geodetiche dello spazio-tempo.

Nel 1976 la discussione dei dati accumulati [cfr. Nordvedt 1976, p. 183] aveva dato i seguenti risultati:

1) L'accelerazione della Terra e della Luna nel campo gravitazionale del Sole sono identiche a meno di una parte su 10^{11}; ciò conferma – con precisione comparabile – l'esperimento di Eötvös-Dicke-Braginsky.

2) Il parametro β – che non può essere ricavato mediante gli esperimenti che utilizzano la variazione della velocità della luce – è $\beta = 1{,}000 \pm 0{,}005$ migliorando sensibilmente la precisione con cui questo parametro era stato ricavato dall'avanzamento del perielio di Mercurio.

3) Le predizioni della teoria generale della relatività sono rispettate a meno di una parte su 100 o meglio; la maggior parte delle altre teorie sono in disaccordo con le osservazioni.

In definitiva, la situazione sperimentale attuale è decisamente favorevole alla teoria di Einstein; l'enorme progresso della tecnologia moderna permette di sperare che in un non lontano futuro sarà possibile effettuare verifiche sperimentali con una precisione 2 o 3 ordini di grandezza superiore a quella attuale.

7. *Altre questioni relative alla gravità.*

Uno dei test piú importanti di una teoria è la previsione di nuovi fenomeni e la loro successiva osservazione. La teoria di Newton è stata piú volte sottoposta a verifiche di questo tipo con risultati favorevoli, come nel caso della scoperta del pianeta Nettuno o in quello dei numerosi sistemi di stelle binarie (o doppie). Anche la teoria di Einstein ha sostenuto vittoriosamente diverse verifiche di questo tipo, come è stato mostrato nel paragrafo 6.

Vogliamo ora esaminare qualche altro problema importante.

Se il campo gravitazionale è molto intenso, il parametro $q = GM/c^2r$ può diventare dell'ordine dell'unità. In tal caso l'approssimazione postnewtoniana non è piú valida, perché i coefficienti g_{ik} non si possono calcolare mediante una somma di potenze di q. Nel caso particolare del campo esterno a una massa sferica M, lontana da altre masse, fin dal 1916 Schwarzschild era riuscito a scoprire la soluzione esatta delle equazioni gravitazionali di Einstein; le proprietà dello spazio-tempo corrispondenti alla soluzione di Schwarzschild sono appunto quelle che hanno permesso di stabilire che nell'approssimazione postnewtoniana i coefficienti β e γ devono essere uguali a 1, se vale la teoria di Einstein.

Quando peraltro q si avvicina al valore critico 1/2, cioè quando la distanza

dal centro della massa si avvicina al cosiddetto «raggio di Schwarzschild» o «raggio gravitazionale»

$$R_S = \frac{GM}{2c^2},$$

le proprietà dello spazio-tempo divengono molto strane.

Prima di spiegare in che cosa consista questa stranezza bisogna notare che per i corpi ordinari R_S è molto minore del raggio «fisico», di modo che nella regione esterna ai corpi stessi, $r \gg R_S$; per esempio, per la Terra $R_S = 0{,}9$ cm; per il Sole $R_S = 3$ km. Affinché il raggio fisico di una massa stellare fosse minore del suo raggio di Schwarzschild, la sua densità dovrebbe essere enorme: $1{,}84 \times 10^{16}$ grammi/cm^3, maggiore anche della densità all'interno di un nucleo atomico. È giusto, perciò, domandarsi se simili densità siano realizzabili in natura; se non lo fossero, sarebbe inutile occuparsene.

La risposta a questa domanda è, però, che attualmente non si conoscono motivi per cui la materia non possa essere compressa fino a queste densità; anzi vi sono serie ragioni per credere che la materia di una stella giunta alla fine della sua evoluzione debba effettivamente essere compressa in forma catastrofica dalla sua stessa gravità fino a densità cosí estreme, se la massa totale supera 3 volte quella del Sole.

Per comprendere le strane proprietà dello spazio-tempo in prossimità del raggio di Schwarzschild, la cosa piú semplice è di pensare al comportamento di due orologi identici A e B – due maser a idrogeno come nell'esperimento delle isole Wallops: uno di essi, A, a grande distanza dalla massa rappresenta un riferimento o campione di comportamento «normale», mentre B a una distanza dal centro di poco maggiore di R_S deve servire a descrivere le proprietà dello spazio-tempo in prossimità del raggio di Schwarzschild.

Per l'effetto del campo gravitazionale sull'andamento degli orologi, la frequenza di B è molto minore di quella di A; in altre parole il tempo in un punto tale che la sua distanza r dal centro della massa è poco maggiore di R_S, scorre molto piú lentamente che in un punto in cui r è molto grande. Al limite, se $r = R_S$, il battito di un secondo – o qualunque intervallo (non nullo) di tempo, per quanto breve – dell'orologio B apparirà lungo come tutta l'eternità, se confrontato con il tempo segnato da A. Ma un osservatore vicino a B non noterebbe nulla di strano, perché tutti i processi fisici sarebbero ugualmente rallentati; per esempio, la vita media di una sostanza radioattiva misurata con l'orologio B avrebbe il valore ordinario. Invece egli giudicherebbe che l'orologio A marcia molto velocemente; al limite, se si trovasse proprio a $r = R_S$, per quell'osservatore tutta l'evoluzione dell'universo si svolgerebbe in un unico attimo fuggente. Questo può parere paradossale, ma non è altro che il risultato dell'esperimento delle isole Wallops portato alle sue estreme conseguenze.

Come conseguenza del rallentamento del tempo, però, un segnale luminoso proveniente dal mondo esterno deve impiegare tutta l'eternità – misurando con l'orologio lontano A – per arrivare a R_S e, naturalmente, un segnale lanciato da R_S impiegherebbe un tempo ugualmente lungo per giun-

gere a qualunque punto del mondo esterno. Ciò significa che tra la regione interna a R_S e quella esterna non c'è possibilità di comunicazione, come se la superficie (ideale) sferica di raggio R_S fosse una barriera insuperabile; si tratta in realtà di due universi distinti, quello interno e quello esterno, senza nessuna relazione causale tra loro. Tutto ciò che succede all'interno del raggio di Schwarzschild non ha il minimo effetto su quello che succede all'esterno.

A questo punto si sarebbe tentati di affermare che la massa interna non esiste nel nostro universo, ma ciò sarebbe sbagliato; il campo gravitazionale dovuto a questa massa si fa sentire all'esterno provocando i soliti effetti sul moto dei corpi, ma si tratta di un campo statico che non potrà mai subire variazioni. Una massa rinchiusa all'interno del proprio raggio di Schwarzschild viene chiamata una «buca nera» (*black hole*), perché nessuna luce può emanare da essa o penetrarvi.

La scoperta di una buca nera sarebbe estremamente interessante, sia come verifica di una predizione della teoria della relatività e sia come conferma delle idee attuali sull'evoluzione delle stelle. Tra l'altro potrebbe darsi che una frazione importante della massa totale dell'universo si trovasse sotto forma di buche nere.

Naturalmente la sola maniera di rivelare l'esistenza di una buca nera è attraverso l'effetto gravitazionale sui corpi circostanti. Per esempio, se si scoprisse che una stella descrive un'orbita intorno a una massa completamente inosservabile, il cui valore supera 3 masse solari, vi sarebbe una grande probabilità che questa massa fosse una buca nera. Un'altra possibilità è che la buca nera vada catturando materia proveniente dallo spazio circostante o risucchiandola da una stella molto vicina; l'energia potenziale liberata da questa materia – prima di giungere al raggio di Schwarzschild – può dar luogo a fenomeni luminosi e soprattutto a emissione di raggi X.

Finora (1978), però, esiste un solo caso, in cui c'è una forte probabilità di trovarsi in presenza di una buca nera: quello della sorgente di raggi X, Cyg X-1. Questa sorgente coincide con la «binaria spettroscopica» HDE 226 868, cioè con una stella, sotto ogni aspetto (quasi) normale, di cui le osservazioni spettroscopiche rivelano un moto orbitale intorno a un centro invisibile. Questo, di per sé, non sarebbe sufficiente, perché potrebbe darsi che questa massa fosse una stella assai poco luminosa, come avviene in numerosissimi altri sistemi; comunque la massa di questo oggetto è in questo caso almeno 6 volte maggiore di quella del Sole. L'indicazione che si tratta di una buca nera viene dall'emissione di raggi X che è quasi certamente prodotta da materia appartenente alla stella visibile, che viene risucchiata dall'altro corpo e sta cadendo verso di esso. Ciò mostra che l'oggetto non visibile è un corpo molto compatto, che con una massa cosí elevata non può essere altro che una buca nera.

Non è possibile soffermarsi sulle proprietà ancora piú straordinarie dello spazio-tempo, che dovrebbero verificarsi nel caso in cui la massa rinchiusa entro il raggio di Schwarzschild possedesse una forte velocità di rotazione. Ma è necessario parlare, sia pure brevemente, di un'altra previsione della teoria della relatività: l'esistenza di onde gravitazionali.

L'idea che una modificazione del campo gravitazionale rispetto a una situazione preesistente – cioè una variazione delle proprietà geometriche dello spazio-tempo – possa propagarsi con velocità finita da un luogo all'altro non è difficile da concepire e forse, dopo la lettura delle pagine precedenti, non risulta del tutto inatteso il fatto che la velocità di propagazione sia uguale a quella della luce, data l'importanza di quest'ultima in tutta la teoria della relatività. Meno naturale può apparire che il moto di una massa isolata non produca sul campo un effetto osservabile, anche nel caso che il moto sia accelerato, contrariamente a quanto accade nel caso elettromagnetico, in cui ogni volta che una carica elettrica compie un moto non uniforme e rettilineo, emette onde elettromagnetiche. Questa è una conseguenza del principio di equivalenza, per cui il moto di una massa non può dirsi accelerato se non relativamente a un'altra massa.

Il problema generale di piú masse in moto relativo presenta difficoltà matematiche formidabili; la soluzione è ben conosciuta solo nel caso di onde deboli, che si propagano in uno spazio-tempo inizialmente uniforme (minkowskiano). In questo caso il problema presenta molte analogie con quello delle onde elettromagnetiche.

Se il moto delle due masse avviene lungo la linea che le unisce, le onde si distruggono per interferenza; si ha emissione di onde gravitazionali solo se il moto ha una componente rotazionale – si noti che in uno spazio-tempo minkowskiano è lecito parlare di rotazione in senso «assoluto» (newtoniano). Nel caso generale di piú masse, il moto deve implicare una variazione di quello che si chiama tecnicamente il «momento di quadrupolo»; per esempio, un cilindro che ruota intorno al proprio asse o si allunga e si accorcia mantenendo la simmetria cilindrica non può emettere onde gravitazionali.

Le onde gravitazionali trasportano una certa quantità di energia, che è fornita dal moto delle masse (radiazione gravitazionale). Questa è una nuova proprietà della gravitazione che ha un'analogia con il campo elettromagnetico; c'è però una differenza essenziale: l'energia dell'onda ha una massa che genera a sua volta un campo gravitazionale; ciò non ha riscontro nel caso elettromagnetico, in cui le onde trasportano energia, ma non cariche elettriche. Ne deriva una «non-linearità» del campo gravitazionale, che è uno dei motivi che rendono cosí difficile la trattazione matematica dei campi intensi, specialmente se non-statici.

Il trasferimento di energia dal moto delle masse all'onda è per lo piú estremamente piccolo. Per esempio, tra i casi che si verificano o possono verificarsi in natura, il sistema Sole-Giove emette una potenza di $5{,}3$ KW $= 5{,}3 \times 10^{10}$ erg/sec, che costituisce una quantità straordinariamente piccola rispetto all'energia totale del sistema, sicché occorrerebbe un tempo immensamente lungo (10^{23} anni!) perché la perdita di energia potesse avere un effetto osservabile sull'orbita. Molto piú favorevole è il caso della binaria ι-Bootis, della classe W Ursae Majoris, per la quale Braginsky ha valutato un'emissione di radiazione gravitazionale di $3{,}2 \times 10^{30}$ erg/sec; benché 1000 volte minore della radiazione elettromagnetica, questa perdita di energia dovuta alla gravitazione può

avere un effetto determinante sull'evoluzione del sistema, perché obbliga le due componenti a fondersi in un'unica massa rotante in un tempo di 2 miliardi di anni, tempo che è molto piú corto dell'evoluzione (nucleare) di una stella singola con la stessa massa.

Il caso piú favorevole è quello di due stelle di neutroni o di due buche nere, perché le masse possono essere molto vicine e quindi girare molto rapidamente intorno al centro comune di gravità. Ruffini e Wheeler hanno calcolato che due masse uguali a quella del Sole alla distanza di 100 Km – il che è possibile solo se i raggi sono minori di 50 Km – avrebbero inizialmente un periodo orbitale di 0,0122 sec; l'emissione gravitazionale sarebbe cosí intensa ($3{,}25 \times 10^{51}$ erg/sec), che l'orbita si trasformerebbe in una spirale e in circa un secondo le due masse si fonderebbero insieme; se anche l'evento si producesse a 3000 anni-luce di distanza, la Terra sarebbe investita da un'onda gravitazionale (di breve durata) con un flusso di $2{,}7 \times 10^7$ erg sec^{-1} cm^{-2}, circa 20 volte maggiore del flusso di energia elettromagnetica che proviene dal Sole sotto forma di luce e di raggi infrarossi [Misner, Thorne e Wheeler 1973, p. 990].

D'altra parte anche l'effetto di un flusso cosí intenso sarebbe difficilissimo da rivelare, perché la capacità dei corpi di assorbire la radiazione gravitazionale, cioè di trasformare l'energia dell'onda in energia meccanica, è straordinariamente piccola. In altre parole la sensibilità di un'antenna gravitazionale è debolissima; in effetti, per ragioni del tutto generali (secondo principio della termodinamica), c'è da attendersi una proporzionalità tra la capacità di emettere e quella di assorbire onde gravitazionali – come avviene per le onde elettromagnetiche.

Ciò conduce ad accennare brevemente al problema di un'antenna capace di rivelare eventuali onde gravitazionali prodotte in qualche evento come quelli descritti, che si verifichi entro la nostra galassia o – se sufficientemente intenso – anche in galassie vicine.

Una possibilità è di considerare un corpo celeste come la Terra o la Luna come un rivelatore di onde gravitazionali. Un'onda che investisse la Terra dovrebbe eccitare vibrazioni (di quadrupolo) del globo terrestre, il cui periodo fondamentale è di 54 minuti; il periodo corrispondente è di 15 minuti per la Luna. L'analisi delle osservazioni sismometriche da parte di Weber mostra che la Terra non è stata mai investita negli ultimi anni da un flusso di onde gravitazionali con il periodo giusto superiore a 3×10^7 erg sec^{-1} cm^{-2} Hz^{-1}; flussi piú deboli non si possono escludere.

Un enorme interesse venne suscitato nel 1969 dall'annunzio da parte di Weber che egli avrebbe osservato onde gravitazionali, provenienti presumibilmente dal centro della Galassia, mediante un rivelatore da lui costruito, sensibile a una frequenza di circa 1660 Hz. Il rivelatore di Weber è essenzialmente un cilindro di alluminio molto omogeneo di 66 cm di diametro e 153 cm di lunghezza del peso di 1,4 tonnellate, sospeso nel vuoto e isolato dall'ambiente mediante convenienti filtri acustici. Se un'onda gravitazionale investe lateralmente il cilindro vi eccita vibrazioni elastiche che sono rivelate da una serie di trasduttori piezoelettrici disposti lungo una fascia centrale. Siccome

l'ampiezza che ci si può aspettare per queste vibrazioni è estremamente piccola, la loro rivelazione pone problemi tecnici di enorme difficoltà; nelle versioni piú recenti di questo tipo di antenna il cilindro è raffreddato alla temperatura dell'elio liquido.

Per evitare l'effetto di microsismi e altre cause locali che potrebbero eccitare il rivelatore, due antenne identiche vennero collocate a circa 1000 km di distanza: una nell'Università del Maryland e l'altra nel Laboratorio delle Argonne (Chicago); l'eccitazione simultanea delle due antenne fu considerata da Weber come il passaggio di un'onda gravitazionale. Nel 1969 egli osservò piú di cento coincidenze, corrispondenti a un flusso di radiazione di 0,1 erg sec^{-1} cm^{-2}. Questo è un flusso molto maggiore di quello previsto; se esso provenisse da una sorgente situata nel centro galattico, implicherebbe una produzione di energia gravitazionale cosí elevata che tutta la massa della Galassia sarebbe irradiata sotto forma di onde gravitazionali in un tempo da 100 milioni a un miliardo di anni, che è molto meno dell'età attribuita comunemente alla Galassia.

Per tale motivo i risultati di Weber sono stati accolti con molte riserve e oggi si tende a considerarli come dovuti a qualche causa strumentale non identificata. Antenne simili sono state successivamente costruite o si stanno costruendo da vari gruppi di studiosi (Stanford, Mosca, Rochester, Frascati...) con tecnologie raffinatissime. Queste antenne, che dovrebbero avere una sensibilità di vari ordini di grandezza migliore di quella dell'antenna originale di Weber, non hanno finora mai rivelato eventi gravitazionali.

La questione dell'effettiva osservazione di onde gravitazionali ha quindi per ora ricevuto una risposta negativa, benché in linea di principio non vi siano dubbi circa la loro esistenza.

Il trasporto di energia da parte di onde gravitazionali dovrebbe potersi descrivere mediante una teoria di tipo quantistico, come si fa per le onde elettromagnetiche. L'emissione e l'assorbimento di onde gravitazionali dovrebbe avvenire per «quanti» o «gravitoni», analogamente all'emissione e all'assorbimento dei «fotoni» o «quanti di luce». Ovviamente nessuno ha mai osservato i gravitoni ed è dubbio se i concetti quantistici possano essere applicati al caso della gravitazione, data la forma «non-lineare» delle equazioni della teoria della relatività.

Da ultimo è necessario accennare brevemente ad alcune questioni riguardanti possibili estensioni o modifiche della teoria della gravitazione. Gli ultimi trent'anni della vita di Einstein sono stati dedicati quasi interamente alla ricerca di una teoria «unitaria» che riunisse in un'unica formulazione matematica la gravitazione, l'elettromagnetismo e altri campi eventuali. Malgrado i suoi sforzi e quelli di altri illustri scienziati come Weyl, Kaluza, Eddington, ecc. questi tentativi si sono dimostrati infruttuosi e sono stati ora quasi completamente abbandonati.

È stato precedentemente accennato alla teoria di Brans e Dicke; questa teoria, prendendo anch'essa le mosse dal principio di Mach, trova necessario introdurre accanto al campo «tensoriale» proprio della teoria della relatività

anche una componente «scalare». Forse l'interesse principale della teoria di Brans e Dicke sta nel fatto che essa prevede una variazione con il tempo delle «costanti universali» e specialmente della costante G della gravitazione. Una variazione delle costanti era stata sostenuta, per ragioni diverse, anche da altri fisici, come Jordan e Dirac; essa presenta grande interesse per la cosmologia.

La teoria di Brans e Dicke prevede uno spostamento del perielio di Mercurio in disaccordo con le osservazioni e sembra perciò da escludere, ma una variazione delle costanti universali con il tempo è piú difficile da refutare. È quindi molto importante verificare se le osservazioni astronomiche si possano conciliare con una eventuale variazione di G. In principio si può basare una verifica di questo genere sull'osservazione del tempo di eco di un segnale radar riflesso da un pianeta. Infatti una variazione di G darebbe luogo a un ritardo nel tempo eco crescente con il quadrato del tempo; una variazione corrispondente a un dimezzamento (o a un raddoppiamento) di G in 10^{11} anni si dovrebbe poter rivelare mediante osservazioni radar di Mercurio.

In realtà questa è una sopravalutazione delle possibilità del metodo. Da una discussione dei dati esistenti nel 1976, Reasenberg e Shapiro hanno potuto stabilire dei limiti alle variazioni possibili di G; essi concludono che la variazione, se presente, è inferiore a quella necessaria a produrre un dimezzamento in 5 miliardi di anni o un raddoppiamento in 15 miliardi di anni. Risultati ottenuti anteriormente da Flandern, che riteneva di aver stabilito, sia pure con un errore del 50 per cento una diminuzione di G, non sono stati confermati.

Un'altra interessante conferma che non è probabile che le costanti siano variate con il tempo viene dall'osservazione di una «quasar» A00235+164. In questo oggetto, estremamente remoto, le righe spettrali indicano una variazione di frequenza di $0{,}52392 \pm 0{,}00010$; se questo *red shift* è di origine cosmologica, la luce che si osserva ora è partita dalla quasar 9 o 10 miliardi di anni fa. D'altra parte le osservazioni radioastronomiche mostrano una emissione monocromatica a una frequenza identica a quella propria di un maser a idrogeno – come si osserva da molte galassie – spostata per un *red shift* esattamente uguale a quello delle righe ottiche. Ciò mostra che per lo meno il rapporto tra le costanti dell'elettromagnetismo e delle interazioni nucleari è rimasto invariato durante un tempo uguale alla metà della età dell'universo.

Tutto sommato non esiste nessuna indicazione sperimentale di una variazione della costante gravitazionale con il tempo; siccome le teorie che prevedono tale variazione sono alquanto vaghe – l'unica teoria avente una giustificazione teorica valida, quella di Brans e Dicke, è esclusa dalle osservazioni – si deve concludere che attualmente (1978) è piú ragionevole continuare a considerare G costante.

In conclusione, tra le varie teorie possibili della gravitazione, quella della relatività generale ha finora resistito vittoriosamente a tutte le verifiche sperimentali. Essa rappresenta uno schema concettuale estremamente valido per descrivere i fenomeni gravitazionali, dalla caduta dei gravi, ai moti dei corpi celesti ed anche ai processi cosmologici. [L. G.].

Alembert, J.-B. Le Rond d'
1765 «Impulsion», in *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, par une société de gens de lettres. Mis en ordre et publié par M. Diderot..., et quant à la Partie Mathématique, par M. d'Alembert...*, Briasson, David, Le Breton, Durand, Paris 1751-65, vol. VIII, p. 635.

Berkeley, G.
1710 *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge*, Pepyat, Dublin (trad. it. Laterza, Bari 1974²).

Cantelli, G.
1958 (a cura di) *Lettere a una Principessa tedesca di L. Euler*, Boringhieri, Torino.

Cavendish, H.
1798 *Experiments to determine the density of the earth*, in «Philosophical Transactions of the Royal Society».

Copernico, N.
1543 *De revolutionibus orbium caelestium*, Petreium, Nürnberg (trad. it. Einaudi, Torino 1975).

Crombie, A. C.
1959 *Medieval and Early Modern Sciences*, Doubleday, New York 1959².

Einstein, A.
1922 *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, Vieweg, Braunschweig (trad. it. Boringhieri, Torino 1968²).

Galilei, G.
1632 *Dialogo dei Massimi Sistemi*, Landini, Firenze; ed. Einaudi, Torino 1970.
1638 *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Elzevier, Leiden; ed. Boringhieri, Torino 1958.

Geymonat, L.
1970 *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, Garzanti, Milano.

Keplero, J.
1618-22 *Epitome astronomiae Copernicanae usitata forma quaestionum et responsionum conscripta*, Plancus, Linz.

Mach, E.
1883 *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Brockhaus, Leipzig (trad. it. Boringhieri, Torino 1968).

Misner, C. W.; Thorne, K. S.; e Wheeler, J. A.
1973 *Gravitation*, Freeman, San Francisco.

Newton, I.
1704 *Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, Smith and Walford, London.
1713 *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Crownfield, Cambridge 1713² (trad. it. Utet, Torino 1965).

Nordvedt, K.
[1976] *Theoretical Significance of the Lunar Laser Ranging Results*, in *Simposio internazionale sulla Gravitazione*, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1977.

Pannekoek, A.
1951 *De groei van ons wereldbeeld, een geschiedenis van de sterrekunde*, Wereld-Bibliotheek, Amsterdam (trad. ingl. Allen and Unwin, London 1961).

Rossi, P.
1973 *La rivoluzione scientifica da Copernico a Newton*, Loescher, Torino.

Sambursky, S.
1956 *The Physical World of the Greeks* (trad. dall'ebraico), Routledge and Kegan Paul, London (trad. it. Feltrinelli, Milano 1959).

Sramek, R., e Fomalont, B.
[1976] *The Gravitational Deflection of Radio Waves*, in *Simposio internazionale sulla Gravitazione*, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1977.

Vessot, R. F. C., e Levine, M. W.
[1976] *A Preliminary Report on the Gravitational Red Shift Rocket-Probe Experiment*, in *Simposio internazionale sulla Gravitazione*, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1977.

Voltaire (F.-M. Arouet)
[1726-33] *Letters concerning the English Nation*, Davis and Lyon, London 1733; ed. franc. Jore, Rouen 1734 (trad. it. Boringhieri, Torino 1968).

Dal punto di vista della **fisica**, la gravità è una delle interazioni elementari e la sua caratteristica fondamentale è l'universalità: non solo i cosiddetti corpi materiali (cfr. **materia**), ma anche ogni **forma** di **energia** (per esempio la **luce**) interagisce gravitazionalmente col resto dell'**universo**. Al centro dei dibattiti circa lo status della **legge** fisica, dei rinnovamenti di **metodo**, dei mutamenti di **paradigma** che la tensione **forza/campo** ha via via prodotto nello sviluppo della **conoscenza** della **natura**, lo studio della gravitazione trova il suo quadro concettuale adeguato nel rinnovamento delle tradizionali categorie (cfr. **categorie/categorizzazione**) di spazio e tempo (cfr. **spazio/tempo**) tipico del punto di vista relativistico. Fra le varie teorie possibili (cfr. **teoria/modello**) della gravitazione, la **relatività** generale sembra infatti resistere a tutti i controlli sperimentali (cfr. **empiria/esperienza**, **esperimento**, **verificabilità/falsificabilità**): essa rappresenta uno schema concettuale (cfr. **concetto, idea**) soddisfacente per la descrizione dei fenomeni (cfr. **fenomeno**) gravitazionali, dalla caduta dei gravi al **moto** dei corpi celesti, nonché la base scientifica di non poche **cosmologie**.

Luce

1. La luce oggi non è quasi mai l'oggetto centrale di un lavoro scientifico. Infatti la natura della luce e l'interazione luce-materia sono gli argomenti meglio approfonditi e compresi in fisica; però la luce è quasi sempre presente dentro un lavoro, perché la radiazione elettromagnetica è il nostro principale strumento di comunicazione e di informazione, cioè di interazione, col mondo esterno.

Come la luce solare ha costituito la piú importante sorgente di energia ordinata per il mondo vegetale durante le sue prime fasi di formazione, cosí essa è pure la sorgente piú potente di informazione che si ha sul mondo esterno. Per questo servizio l'uomo dispone di un recettore eccezionalmente perfetto, l'occhio, che probabilmente è il principale responsabile, assieme alle dimensioni del cervello, della posizione privilegiata che egli occupa in natura. Per farsi un'idea della complessità dell'occhio umano, basta considerare che in esso circa 120 milioni di fotorecettori trasmettono i segnali, attraverso la rete neuronica della retina, a milioni di fibre nervose ottiche e quindi alle aree del cervello preposte alla visione. Si stima poi che ogni cellula nella corteccia cerebrale stabilisca da mille a diecimila sinapsi con altre cellule corticali che sono dell'ordine di 10^{10}. Tale meraviglia, intuita fin dai tempi piú antichi, porta però a sottovalutare il contributo, viceversa decisivo, che nella perfezione del processo della visione ha il tramite luce, con il flusso enormemente maggiore di informazione che essa è in grado di trasportare rispetto ai tramiti degli altri processi sensoriali come per esempio il suono o gli effluvi odoriferi e saporiferi. Essa viene espressa anche dicendo che la vista è un senso obiettivo, tale espressione implicando una distinzione netta soggetto e oggetto, mondo esterno e osservatore che, radicata profondamente nel nostro modo di confrontarci con la realtà perché perfettamente legittimata dalla vita di ogni giorno, ha creato viceversa alcune difficoltà in tutte quelle (per lo piú recenti) esperienze di frontiera nel molto piccolo e nel molto distante o molto veloce. Contrariamente a come si pone rispetto agli altri suoi sensi, l'uomo tarda a riconoscere che ciò che vede dipende pur sempre da un recettore per quanto estremamente sviluppato. Egli dimentica pure che, contrariamente a quanto gli succede ad esempio per l'impressione del movimento, per la vista è sprovvisto di organi effettori, duali al recettore occhio, che renderebbero meno passivo il processo della visione. Gli è connaturata perciò un'illusione spazio-temporale che gli funziona da gabbia astratta nei riguardi dell'approfondimento del reale.

2. Per luce comunemente viene definito quell'ente fisico che rende visibili la forma, il colore, le dimensioni degli oggetti che ci circondano, ma questa definizione, non del tutto soddisfacente, cela numerosi problemi: essa implica, ad esempio, il processo della visione umana, non ancora completamente chiarito e sul quale ancora oggi fervono le ricerche. Occorre innanzitutto distinguere le proprietà intrinseche della luce da quelle apparenti, legate ai meccanismi di ela-

borazione del sistema occhio-cervello. Ad esempio, nel XVIII secolo era generalmente accettata la teoria che vi fossero tre «colori primari» (rosso, giallo e blu) e che tutti gli altri potessero essere ottenuti mediante miscele di questi. Ma solo nel 1802 il medico inglese Thomas Young comprese che l'esistenza di tre «colori primari» non dipendeva dalla fisica della luce né dalla natura chimica dei coloranti, bensí dal particolare meccanismo di risposta dell'occhio ai colori: infatti nei coni dell'occhio umano sono presenti tre pigmenti la cui sensibilità è massima rispettivamente nel rosso, nel verde e nel blu. Per dare un significato oggettivo (indipendente cioè dal sistema occhio-cervello) a proprietà della luce quali l'intensità, il colore, ecc. è necessario correlare tale proprietà con qualche grandezza fisica che possa essere misurata con strumenti diversi dall'occhio umano; in altre parole è necessario formulare una teoria fisica della luce.

3. Se la luce è stata talvolta responsabile involontaria di alcune ingenuità e travisamenti del reale, è stata pure quella che piú ha aiutato a uscirne fuori. Per fare un esempio, appartiene storicamente all'ottica il concetto di potere risolutivo di uno strumento, e tale concetto è l'espressione fondamentale della consapevolezza dei limiti di ogni impostazione gnoseologica che sia uscita dall'infanzia. Cosí lo sviluppo scientifico è un continuo interagire con la luce, segnato da periodici confronti critici, che portano a ripensamenti sulla sua natura, estremamente fruttuosi e spesso rivoluzionari.

Da sempre la luce percorre e accompagna lo studio della natura. Perciò lo sviluppo delle conoscenze sulla luce e il progredire delle tecniche per la sua produzione e utilizzazione è un filo che percorre nei secoli tutto quanto lo sviluppo scientifico e tecnico, legando assieme tutti i settori della ricerca e ponendosi come riferimento centrale delle varie teorie sulla natura e sul modo di investigarla.

4. Lo studio della luce e delle sue proprietà ha avuto da sempre un'enorme influenza sullo sviluppo sia della scienza sia della tecnologia e ha fornito un esempio evidente della potenza dei metodi scientifici. Gli strumenti ottici hanno enormemente esteso le capacità visive dell'uomo, facendogli scorgere nuovi mondi e nuovi orizzonti: lo spettroscopio e il microscopio hanno permesso agli scienziati di indagare la struttura della materia inerte e vivente, il telescopio ha permesso di osservare e seguire i movimenti degli astri dell'universo. Non è un caso che la velocità finita della luce sia stata rivelata per la prima volta con il telescopio che mise in evidenza l'aberrazione della luce degli astri. Infine la fotografia ha rivoluzionato le comunicazioni permettendo una piú rapida ed efficace estensione della conoscenza e dell'informazione.

5. La questione della natura della luce ha agitato il pensiero occidentale fin dal tempo di Pitagora. Verso la fine del secolo scorso essa diventò il problema fondamentale della scienza fisica. La teoria corpuscolare dei newtoniani, quella ondulatoria dei seguaci di Huygens, l'ipotesi dell'etere furono questioni centrali di filosofia naturale dibattute animatamente durante i secoli passati.

6. Sulle evidenze sperimentali dell'ottica geometrica fu fondata la fiducia nello spazio continuo della geometria euclidea. Infatti Descartes fonda contemporaneamente l'ottica geometrica e la geometria analitica che si sostengono a vicenda perché retta e raggio di luce si identificano nella nostra immaginazione. Newton, pur professandosi corpuscolare sulla luce, è però il primo a toglierle la veste cartesiana astratta e austera perché è il primo, nel 1666, a disperdere in laboratorio la luce solare nel suo spettro, rivelando cosí tutta la ricchezza dei gradi di libertà che la luce celava e che Goethe all'interno delle sue proteste estetiche non riuscí ad afferrare. L'analisi di Fourier della vibrazione luminosa cosí realizzata è pure a fondamento della trattazione moderna della radiazione elettromagnetica; infatti l'essenza del metodo della teoria quantistica della radiazione (QTR) parte da questa evidenza per decomporre il campo elettromagnetico generico in componenti singole, che possono essere facilmente quantizzate.

7. Successivamente all'ottica geometrica, la luce ondulatoria ovvero elettromagnetica, grande trionfo della fisica classica, è la realizzazione piú concreta e convincente del concetto di campo; fu quindi l'affossatrice principale del meccanicismo e quindi pure di una grossa fetta di materialismo volgare. Infatti una delle conseguenze piú significative della teoria ondulatoria è che la luce di lunghezza d'onda definita riflessa da un corpo non può riprodurre fedelmente, nell'immagine di quel corpo, dettagli che abbiano dimensioni inferiori a tale lunghezza d'onda. È questo il motivo per cui al microscopio ottico subentra, per indagare l'ancor piú piccolo, il microscopio elettronico, perché gli elettroni hanno lunghezza d'onda inferiore a quella della luce.

8. La teoria fondamentale sulla natura della luce fu messa a punto nel 1861 da James Clerk Maxwell. Le sue otto equazioni differenziali costituiscono la sintesi di un secolo di studi sperimentali e teorici sull'elettromagnetismo. Quando Maxwell ricavò le sue equazioni, si rese conto che esse ammettevano, anche in assenza di cariche o correnti, l'esistenza di onde costituite da campi elettrici e magnetici oscillanti e dotate di una velocità ben determinata che nelle equazioni di Maxwell compare come prodotto di parametri elettrici e magnetici caratteristici del mezzo in cui le onde si propagano. Ora questa velocità risultò molto prossima al valore direttamente misurato della velocità della luce, fatto, questo, che suggerí allo studioso l'ipotesi che la luce fosse un'onda elettromagnetica. La teoria di Maxwell fornisce quindi un collegamento fondamentale tra la luce e i fenomeni dell'elettricità e del magnetismo: è possibile interpretare tutte le proprietà della luce in termini di proprietà di campi elettrici e magnetici oscillanti, campi misurabili, almeno in linea di principio, in maniera indipendente dal meccanismo della visione umana. In base a tale teoria l'intensità di un'onda luminosa è legata all'ampiezza di oscillazione del campo elettrico e del campo magnetico di essa, mentre il colore della luce è legato alla frequenza di tale oscillazione. (Spesso invece che della frequenza ν di un'onda luminosa, si parla della sua lunghezza d'onda λ, definita dalla relazione $\lambda = c/\nu$, dove c è la velocità della luce).

Per fare un esempio, una comune lampadina da 100 W ha un rendimento di circa il 15 per cento e produce nello spazio circostante un'onda elettromagnetica il cui campo elettrico oscilla con un'ampiezza che alla distanza di 1 metro è di circa 0,23 V/cm. Il Sole invece irraggia, nelle giornate serene, circa 1000 W di potenza su ogni metro quadrato illuminato. All'intensità del Sole corrisponde un'onda elettromagnetica il cui campo elettrico oscilla con ampiezza di circa 6,24 V/cm. Sulla base di questo collegamento colore-frequenza o lunghezza d'onda, alla luce rossa corrispondono lunghezze d'onda attorno ai 650 nanometri (1 nanometro = 10^{-9} metri), alla luce verde lunghezze d'onda attorno ai 550 nanometri, alla luce violetta lunghezze d'onda attorno ai 400 nanometri. Di tutte le onde elettromagnetiche solo quelle con lunghezze d'onda comprese tra 370 e 670 nanometri costituiscono la luce propriamente detta, cioè quella visibile. Comunque anche se le onde elettromagnetiche in grado di stimolare l'occhio umano costituiscono soltanto una cosí piccola parte di tutto lo spettro delle onde elettromagnetiche, rimane il fatto che, secondo le equazioni di Maxwell, tra la luce visibile e le altre onde elettromagnetiche (onde radio, ad esempio) non esiste alcuna sostanziale differenza fisica, a parte naturalmente la frequenza di oscillazione: in particolare tutte le onde elettromagnetiche subiscono i fenomeni della diffrazione, diffusione, interferenza, riflessione, ecc. con le stesse modalità e le stesse leggi della luce ordinaria. Questa limitazione dell'occhio umano a una banda cosí piccola dello spettro delle onde elettromagnetiche pare sia dovuta piú che altro a una condizione accidentale del sistema Terra-Sole e a ragioni di praticità e di efficienza ricettive: infatti l'atmosfera presenta una «finestra» di trasparenza per la luce visibile proprio là dove il Sole ha un massimo di emissione di onde elettromagnetiche; e la natura ha pensato bene di approfittarne sviluppando negli organismi superiori recettori speciali su tale banda, piccoli ma estremamente raffinati e sofisticati.

Approfittare della finestra sulle microonde avrebbe comportato recettori molto piú ingombranti.

L'avere unificato la fisica della luce visibile, cioè la scienza dell'ottica, con la fisica dell'elettricità e del magnetismo, è una delle principali conquiste della teoria di Maxwell e non solo dal punto di vista teorico ma anche dal punto di vista pratico. Basti pensare che tutta la scienza delle telecomunicazioni è fondata sulla teoria di Maxwell: infatti come la luce visibile è in grado di portare ai nostri occhi informazioni su oggetti lontanissimi come le stelle e le galassie dell'universo, cosí anche le altre onde elettromagnetiche possono trasferire informazioni da un punto all'altro dello spazio. Inoltre i meccanismi con cui un'onda elettromagnetica può trasportare informazioni (cioè segnali) devono essere gli stessi di quelli con cui la luce rende visibili gli oggetti, cioè mediante variazioni di intensità (chiaro-scuro) o di colore. Cosí, per esempio, nel campo delle radioonde (onde elettromagnetiche di bassa frequenza), tali meccanismi di trasmissione di informazione corrispondono rispettivamente alle modulazioni di ampiezza e di frequenza impiegate nelle comuni radioriceventi e trasmittenti.

9. La teoria elettromagnetica della luce ebbe un tale successo nel prevedere una quantità enorme di fenomeni tanto disparati che verso la fine del secolo scorso molti pensavano che il compito fondamentale della fisica fosse prossimo ad esaurirsi. Tale fiducia fu presto rotta. La scoperta di nuovi fenomeni, come lo spettro di incandescenza delle sostanze, l'effetto fotoelettrico, i raggi X, la radioattività, scossero il mondo della fisica fin dalle fondamenta: la teoria classica dell'elettromagnetismo conduceva a clamorosi paradossi quando applicata a tali fenomeni. Infatti, nonostante l'enorme successo incontrato dalla teoria di Maxwell nella spiegazione e previsione dei fenomeni ottici, elettrici e magnetici, due grosse questioni non riuscivano a farsi inquadrare all'interno della teoria: il fallimento dell'esperienza di Michelson-Morley (1887) nel rilevare la presenza di un «etere» attraverso cui le onde di Maxwell potessero propagarsi, e il risultato assurdo della teoria di Rayleigh-Jeans secondo la quale un corpo perfettamente assorbente per la luce (corpo nero) avrebbe dovuto irraggiare una quantità infinita di energia sull'intero spettro della radiazione elettromagnetica. Fu per risolvere quest'ultimo paradosso che Max Planck introdusse l'ipotesi rivoluzionaria che gli atomi potessero assorbire e cedere energia solo in quantità discrete dette «quanti», mentre fu per risolvere la questione dell'«etere» in modo consistente con il risultato dell'esperienza di Michelson-Morley che Einstein introdusse la sua teoria della relatività.

È da notare in ogni modo che nessuna di queste ipotesi cosí rivoluzionarie, che costrinsero a una revisione degli stessi concetti di spazio, di tempo, di determinismo e di causalità, è in contrasto con la teoria maxwelliana della luce. Anzi, nella sua teoria Einstein preferí rinunziare al concetto di tempo assoluto pur di mantenere intatte le equazioni di Maxwell.

10. Dalla teoria della relatività in poi la velocità della luce (c) è qualcosa di diverso dalla velocità di un oggetto qualsiasi. Il valore assoluto, cioè indipendente dal sistema di riferimento, ovvero dal moto della sorgente e del recettore, e massimo della velocità della luce costituisce una legge fisica, in quanto basata sull'esperienza, che assegna alla luce proprietà uniche in natura. Tale legge può enunciarsi come principio di unicità della luce. Tale principio fisico si divide in due parti: principio del carattere limite della velocità della luce e principio della unicità metrica della luce. La prima parte, che continua a valere anche in relatività generale, afferma che la luce ha la velocità piú alta possibile (in 1 nanosecondo la luce percorre circa 30 centimetri). Essa è fondata sull'esperienza che per accelerare un corpo qualsiasi fino alla velocità della luce bisogna fornirgli un ammontare infinito di energia. In altre parole si fonda sulla famosa equivalenza fra massa ed energia. Un'analogia, suggerita da Weyl, forse chiarisce bene tale caratteristica limite: la velocità della luce avrebbe un ruolo simile a quello dell'angolo giro nel piano, cioè andrebbe vista piú come una proprietà intrinseca della geometria dello spazio-tempo che come una vera e propria grandezza fisica. Come è naturale misurare gli angoli in frazioni dell'angolo giro, cosí sarebbe piú naturale misurare la velocità dei corpi in frazioni di c piuttosto che

in metri al secondo. Come non ha senso un angolo nel piano maggiore dell'angolo giro, cosí risulterebbe evidente che non ha senso una velocità maggiore di quella della luce. Un'altra maniera suggestiva ma incompleta per esprimere in sintesi il principio del carattere limite della velocità della luce è dire che la luce non ha l'esperienza dello scorrere del tempo, che non invecchia. Sulla base di tale carattere limite l'onda elettromagnetica risulta l'archetipo della propagazione causale nel senso che molti altri processi causali (propagazione di onde elastiche, flussi di correnti elettriche, ecc.) sono riducibili a serie di processi elettromagnetici elementari e sono pertanto necessariamente piú lenti.

Per quanto riguarda tutti i rimanenti processi interattivi elementari, i meccanismi che li regolano sono oggi abbastanza conosciuti. La propagazione delle interazioni nucleari forte e debole, che sono a corto raggio di azione, avvengono mediante scambio di adroni e bosoni vettoriali intermedi rispettivamente, i quali essendo particelle massive viaggiano necessariamente con velocità minore di *c*. Tale meccanismo generale di scambio di particelle, attraverso il quale si propagano tutte le interazioni, fu ipotizzato per la prima volta nel 1935 da Yukawa sulla base dell'analogia con il campo elettromagnetico dove a propagarsi fra le cariche interagenti sono appunto le onde elettromagnetiche cioè i fotoni. Yukawa allora fissava pure una regola molto semplice, basata sul principio di Heisenberg e universalmente confermata, di proporzionalità inversa fra raggio di azione di un'interazione e massa delle particelle che propagandosi fanno da tramite dell'interazione. Cosí sulla base di questa regola le forze elettromagnetiche e gravitazionali, che sono a raggio di azione infinito, devono procedere attraverso la propagazione di particelle entrambe di massa zero, il fotone e il gravitone rispettivamente, alla velocità massima consentita *c*. Si affrontano proprio in questi anni esperienze che dovrebbero garantire, almeno localmente, l'evidenza sperimentale definitiva sulla velocità finita, *c*, di propagazione dell'attrazione gravitazionale.

La seconda parte del principio di unicità della luce è espressa grossolanamente dicendo, con Einstein, che la velocità della luce è costante in ogni sistema di riferimento, piú correttamente che la velocità della luce è costante anche se la metrica dello spazio-tempo è stata definita, indipendentemente dalla luce, in termini di campioni di lunghezze e di orologi, ovvero che la velocità della luce può essere definita costante senza che ciò porti a delle contraddizioni. *Può* essere definita perché ogni misura di velocità, come ci hanno insegnato il genio e il coraggio di Einstein, contiene in sé l'elemento arbitrario della definizione di simultaneità di due eventi. Ora, non a caso la definizione einsteiniana di simultaneità di due eventi fa uso del segnale luminoso e non di un qualunque altro segnale, per esempio un segnale acustico. Perché la simultaneità definita attraverso quest'ultima geometria, per cosí dire del suono, porterebbe a contraddizioni all'interno della definizione causale di ordinamento temporale non appena si avesse a che fare con segnali piú veloci del suono. Infatti chi ha ipotizzato i tachioni, cioè particelle che dovrebbero viaggiare con velocità superiore a quella della luce, ha dovuto ammettere che essi violerebbero il principio di causalità a meno che non venissero considerate particelle ad energia negativa viaggianti a ritroso nel tempo.

La simultaneità di due eventi viene definita attraverso segnali luminosi, cioè attraverso un processo dinamico, cosicché le proprietà di invarianza della geometria spazio-temporale vengono ricavate dalle proprietà di invarianza della elettrodinamica di Maxwell. Ecco un bell'esempio di quanto si sosteneva sopra, cioè di come la luce originariamente responsabile di una nostra passata concezione ingenua dello spazio-tempo, legata alla passività del nostro senso visivo, rovescia il suo ruolo con il salto evolutivo einsteiniano e si rivela processo fisico primario nella costruzione della nuova percezione spazio-temporale, rovesciando contemporaneamente il rapporto fra processi dinamici e geometria spazio-temporale.

11. La sua natura per cosí dire immateriale situa la luce in posizione particolare rispetto agli oggetti. Come tramite della visione essa è soggetto e oggetto dell'indagine e, se da una parte scombussola l'impostazione materialistica che via via si ripropone per la natura, offre dall'altra il destro a concezioni troppo rarefatte sulla sua natura, quale quella sostenuta da Polvani [1934], in un'esposizione che peraltro si raccomanda come eccellente trattazione storica fino a tutto il paragrafo 21, cioè per tutta la parte classica, fino alla fine del secolo scorso. Polvani riduce la luce a forma particolare di azione a distanza fra corpo luminoso e corpo illuminato (ritardata nel tempo), alla quale si riconnette un corrispondente trasferimento di energia anch'esso ritardato nel tempo. La velocità *c* viene ridotta a «costante universale, che originariamente e sostanzialmente ha il significato di coefficiente di ragguaglio fra le misure di tempo e quelle di spazio e che è atta a fornirci i ritardi del trasferimento dell'energia raggiante» (p. 574). Tale impostazione nasce dalla constatazione che «l'ipotesi della costanza della velocità della luce è tutt'altro che intuitiva» [*ibid.*, p. 572]. Però, a ben guardare, l'intuizione di Polvani sottende tacite assunzioni prerelativistiche, che ignorano cioè i requisiti della relatività, quale quella della necessità della definizione di simultaneità. A rafforzare l'equivoco, egli fa pure appello a quella facile confusione epistemologica che nasceva in quegli anni, e che perdura tuttora, attorno al «principio» di complementarità di Bohr, di incertezza di Heisenberg e alla pretesa originaria di quest'ultimo di lavorare solo su grandezze osservabili. Pretesa che egli stesso ammetterà ingenua piú tardi, dopo averne discusso con Einstein e averci riflettuto a lungo proprio in occasione della pubblicazione del principio che porta il suo nome.

Cosí spesso concezioni apparentemente rivoluzionarie si fondano in realtà su interpretazioni ancora arretrate, e piene di vecchi residui, delle vere rivoluzioni. Rinunziando al concetto di propagazione luminosa, Polvani pecca di troppo zelo e assieme all'etere scarta pure tutto il campo elettromagnetico della radiazione luminosa che per lui resta solo «pura rappresentazione, utilissima all'interpretazione di fenomeni, ma inesistente come realtà rivelabile per sé sola» [*ibid.*]. Cioè assieme all'acqua del bagno butta via pure il bambino. Egli forse pagava cosí il suo contributo di appoggio un po' anomalo, ma interessante e autorevole, all'idealismo egemone in quel tempo in Italia.

Nella parte finale di quell'articolo «Luce», pur pregevole per il resto, sono

pure presenti due asserzioni errate, laddove si sostiene che «il fenomeno di interferenza della luce appare inspiegabile nella teoria quantistica», errore che era stato confutato da Fermi nel 1930. E laddove si scrive che nei fenomeni meccanici il trasferimento di energia e impulso è istantaneo, quando invece è quasi sempre piú lento e certamente mai piú rapido che nei fenomeni elettromagnetici. Eppure ai tempi della prima edizione della Treccani erano già avviate quelle ricerche poderose che verranno poi raccolte sotto il nome di teoria quantistica della radiazione (QTR) ed elettrodinamica quantistica (QED), mentre la relatività non era stata ancora digerita dalla comunità scientifica internazionale come testimoniano Dirac e indirettamente lo stesso Polvani quando segna fra i pochi trattati il libro di quello Hoppe che nel 1926 citava Einstein solo una volta per il suo contributo del 1905 alla interpretazione del moto browniano.

12. Si sta dando oggi grande impulso alle ricerche volte a privilegiare la luce, come strumento di informazione, rispetto alle altre bande di radiazione elettromagnetica. Tali ricerche nel campo delle telecomunicazioni sono in corso in tutto il mondo, dato il loro grande interesse scientifico, tecnologico ed economico. La ragione principale di questo interesse è che la luce ha una capacità di trasmettere informazioni di vari ordini di grandezza superiore a quelle delle radioonde e delle microonde. Infatti dalla teoria dell'informazione è noto che il flusso massimo di informazione (calcolato in bit al secondo) che una sorgente di segnali può emettere è dato dall'espressione $I = \nu \log_e [1 + (S/N)]$, dove I è il flusso di informazioni, ν è la frequenza della sorgente, S/N è il rapporto tra l'energia del segnale che porta l'informazione e l'energia dell'eventuale rumore di fondo ad esso sovrapposto. Siccome le frequenze delle vibrazioni luminose sono circa dieci milioni di volte piú alte di quelle delle onde radio, la luce può trasportare una quantità di informazione veramente enorme.

13. Naturalmente la presenza di rumore di fondo diminuisce la capacità di trasmissione di una sorgente. Nel processo della percezione visiva, ad esempio, tipiche sorgenti di rumore di fondo sono la torbidità dell'aria e la luce riflessa da oggetti diversi da quello che si sta osservando. Se lo sfondo è molto piú luminoso dell'oggetto considerato, esso non è piú distinguibile (ciò corrisponde a $S/N \ll 1$, di modo che la formula precedente fornisce una capacità di trasmissione $I \simeq 0$).

Comunque in qualche caso anche dalle fluttuazioni casuali del rumore è possibile ricavare informazioni quantitative sugli oggetti, come fu mostrato per la prima volta da Einstein, con la sua teoria del moto browniano. Ne è un altro esempio la teoria di Rayleigh per la diffusione della luce del Sole da parte del cielo. Essa si basa sul moto completamente casuale delle molecole dell'aria ed è in grado di spiegare tra l'altro perché il cielo appare azzurro pur essendo illuminato dalla luce bianca del Sole.

D'altronde, è stato proprio dallo studio del «rumore termico» della luce, cioè dalla radiazione di corpo nero, che è nata la teoria quantistica, la quale, insieme alla teoria della relatività, costituisce uno dei cardini dell'attuale concezione fisica del mondo. Si noti ancora una volta che entrambe queste teorie, la teoria della relatività e quella quantistica, sono state originariamente formulate nel tentativo di chiarire fenomeni concernenti la luce.

14. Einstein quantizza la radiazione elettromagnetica nel 1905, cioè deriva per primo la necessità dell'esistenza del fotone, applicando le leggi di fluttuazione della meccanica statistica alla radiazione del corpo nero. E, dato che tali fluttuazioni sono una necessità termodinamica basata sul secondo principio, ne risulta che l'esistenza del fotone deriva, per la prima volta, dalla termodinamica. In termini di teoria dell'informazione il fotone nasce, sempre attraverso il secondo principio della termodinamica, dalla constatazione che la quantità minima di luce necessaria per un'osservazione ubbidisce alla statistica di Poisson degli eventi rari. Il secondo principio, invocato per derivare il fotone, rivela pure la proprietà di ubiquità del fotone ovvero il fatto che fasci molto deboli di luce non possono essere concentrati. Il fotone fornisce finalmente la misura naturale per contare l'energia luminosa. Cosí oggi si può pure dire che sono i fotoni a portare le informazioni da un punto all'altro dello spazio alla velocità della luce. Ma una conseguenza notevole dell'ipotesi fotonica, che la differenzia da quella ondulatoria, è che i fotoni possono trasportare una quantità di informazione limitata. In altre parole esiste un «rumore quantistico» di fondo dei fotoni che limita la loro capacità di trasmettere informazioni. Tale rumore quantistico è intrinseco e ineliminabile: esso è strettamente connesso con il cosiddetto «principio di indeterminazione» o di incertezza di Heisenberg.

Una conseguenza immediata della formula che dà il flusso massimo di informazione è che se in essa $N \neq 0$ allora per trasmettere informazioni è necessario che sia pure $S \neq 0$: in altre parole non si possono trasmettere informazioni senza spendere energia. E si ritrova cosí il primo principio della termodinamica.

15. Dopo la prima guerra mondiale ha finalmente libero corso lo sviluppo della trattazione relativistica e quantistica dei fenomeni naturali della materia e della radiazione. Particolarmente battuta è la spettroscopia atomica, perciò l'interazione elettrone-fotone. Si quantizza il campo elettromagnetico, Dirac (1928) ricava la sua equazione relativistica per l'elettrone, grande esempio, ultimo purtroppo, di incontro felicissimo tra fisica e matematica. La teoria di campo sull'interazione elettrone-fotone che ne viene fuori è l'elettrodinamica quantistica (QED).

L'elettrodinamica quantistica è forse la teoria piú confermata dai dati sperimentali che oggi si possiede. In qualche caso, come per lo spostamento di Lamb e per il momento magnetico anomalo dell'elettrone, essa è in accordo con l'esperienza con una precisione che è quasi incredibile. Tale successo è dovuto, oltre che ai solidi fondamenti su cui posa la teoria, anche al fatto che per essa funziona egregiamente quella tecnica generale di calcolo, già molto collaudata e potentissima, che si chiama teoria delle perturbazioni.

16. Nella QED il fotone è considerato alla stessa stregua delle altre particelle elementari e deve ubbidire alle medesime leggi. Questa unificazione tra luce e materia ha una enorme importanza concettuale, paragonabile alla grande conquista di Maxwell di avere unificato le leggi dell'elettromagnetismo con quelle dell'ottica. In particolare le interazioni tra materia e luce possono essere considerate come «urti» tra particelle in cui valgono le leggi di conservazione dell'energia, della quantità di moto, della carica elettrica, ecc.

Ma se il fotone è una particella elementare come l'elettrone e il protone, viene spontaneo chiedersi quale sia la massa del fotone. Come già detto, molte e valide sono le ragioni per pensare che la massa del fotone sia nulla. Riguardo alla conferma sperimentale, osservazioni sul campo magnetico di Giove eseguite nel 1975 da strumenti situati a bordo del veicolo spaziale Pioneer 10 hanno portato a un limite superiore per la massa del fotone di $4 \cdot 10^{-48}$ grammi (per raffronto la massa dell'elettrone, la piú leggera delle particelle massive conosciute, è di circa 10^{-27} grammi). La relazione relativistica fra energia, impulso e massa di una particella comporta per il fotone un impulso proporzionale alla sua energia (e quindi alla sua frequenza). La massa di un corpo sufficientemente grande deve influenzare sensibilmente un fascio di luce che gli passa vicino. Tale fenomeno, previsto dalla relatività generale, è confermato dalle osservazioni, fatte in periodi di eclisse solare, della deflessione dei raggi di luce passanti vicino al Sole, provenienti da stelle e da Mercurio. L'effetto di deflessione è dovuto al fatto che la luce è un segnale elettromagnetico che viaggia lungo il cammino piú breve possibile che connette due corpi elettromagneticamente interagenti. In assenza di masse intermedie tale cammino appare all'osservatore quello di una linea retta. Viceversa in presenza di corpi massivi, o comunque di forti concentrazioni di energia, la teoria della relatività generale prevede una curvatura diversa da zero della geometria dello spazio-tempo, per cui la distanza piú breve fra due punti elettromagneticamente interagenti non risulta piú all'osservatore quella percorsa lungo una linea retta. Ad essere influenzata dalla presenza di masse lungo il suo cammino è pure la frequenza della luce, che si sposta verso frequenze piú basse o piú alte come fu verificato sperimentalmente in maniera definitiva negli anni '50 attraverso osservazioni molto accurate degli spettri stellari. Una verifica sperimentale di laboratorio su distanze terrestri di questo *red shift* gravitazionale fu eseguita nel 1965 su fotoni gamma Mössbauer inviati verso l'alto lungo la torre dell'Università Harvard. Tale interazione fra la luce e il campo gravitazionale trova la conseguenza sua piú suggestiva nell'ipotesi astrofisica dei buchi neri, derivanti da ammassi collassanti per gravità, che cioè implodono succhiando dentro tutto, perfino la loro luce.

17. Accanto agli studi di QTR, di QED e di spettroscopia atomica, si profila però nel periodo dal 1930 al 1960 l'avvento e il prevalere, fra le ricerche di avanguardia, delle tecniche di rivelazione e rilevazione attraverso il bombardamento della materia con particelle diverse dal fotone, gli elettroni, i protoni, i neutroni, poi i mesoni (ora siamo ai neutrini), cioè con le cosiddette particelle nucleari.

Si consolida cioè quella che si può chiamare fase nucleare delle ricerche, con un predominio dei dati di diffusione nucleare sui dati di spettroscopia elettromagnetica per lo studio della struttura della materia. Tali tecniche erano iniziate con gli esperimenti di Laue e di Rutherford che furono i primi a guardare direttamente il mondo senza il tramite della luce ma invece attraverso fasci di particelle massive sparati contro i microoggetti in esame. L'ottica pura diventa una vecchia gloria e dovrà aspettare gli sviluppi delle ricerche di Rabi, Townes, Abbe, Zernicke e Gabor sull'ottica non lineare, i maser, i laser, gli ologrammi, per ripresentarsi alla ribalta. L'ottica pura cede il passo ad altre ricerche di frontiera ma ha lasciato sul terreno il frutto suo piú prezioso, il fotone, che interagendo con l'elettrone e le altre particelle celebra i fasti della QED, della teoria relativistica di Dirac (che prevede le antiparticelle) e della scoperta della fotoproduzione, quest'ultimo fenomeno chiave di ogni presente e futura teoria sui fondamenti della materia.

18. La centralità della luce in fisica, la sua unicità, il ruolo di chiarificatrice che nei momenti critici di svolta ha sempre avuto la luce, il grosso bagaglio di conoscenze sicure che si hanno sull'interazione fotone-materia, portano ad assegnare al fotone un ruolo primario nello studio degli stati fondamentali della materia. Tra le particelle elementari molte teorie assegnano al fotone una posizione privilegiata. In particolare molte fra quelle che si fondano sul ruolo cruciale delle idee di simmetria e di simmetria rotta nell'analisi degli stati basilari della materia. Esse partono dall'osservazione che, come attraverso il requisito dell'invarianza rispetto alle trasformazioni di Lorentz del campo, costruito con gli operatori di creazione e distruzione dei fotoni, dalle semplici proprietà di particella del fotone (cioè dal fatto che esso è una particella di massa zero e spin 1), si può far discendere tutta l'ottica e tutta l'elettrodinamica, ovvero le equazioni del campo elettromagnetico, e riconoscere poi che esse sono invarianti per trasformazioni di calibro (*gauge*), cosí si può rovesciare tutto il procedimento e cioè partire dall'invarianza di calibro per arrivare alle proprietà del fotone, cioè partire dalle simmetrie del fotone per arrivare alle sue proprietà di particella. Tale riformulazione della teoria elettromagnetica sulla base della simmetria di calibro può essere generalizzata alle altre teorie di campo coinvolgendovi cosí anche le altre particelle. Si tratta perciò di un programma che, partendo da proposte diverse di simmetria interna e spazio-temporale, mira a ricavare unitariamente, attraverso la rottura esatta sebbene spontanea di tale simmetria, le proprietà di intere famiglie di particelle che verrebbero cosí ricavate tutte da un unico principio unitario. Cosí su questa base, in alcune di queste teorie, il fotone risulta il membro piú visibile di una famiglia di particelle elementari ricavate da un gruppo generalizzato di simmetria che media le interazioni elettromagnetica, debole e forse anche la forte e che quindi unifica il fotone con i leptoni e forse pure con gli adroni, risultando perciò la manifestazione di un principio di simmetria della natura che descrive le interazioni fondamentali della materia. Altre teorie, partendo sempre dalle invarianze di calibro, tentano di unificare il campo elettromagnetico con quello gravitazionale. Altre ancora, all'interno della famiglia

delle particelle fondamentali, dànno la precedenza ai fermioni sui bosoni, anche sulla base della constatazione che la materia stabile è essenzialmente costituita da elettroni, protoni e neutroni, tutti fermioni, e quindi sfavoriscono il fotone, che da particella elementare scadrebbe al rango di particella composta, formata per esempio con campi fermionici di Weyl. Quelle fra queste teorie che derivano dalla teoria di Yang e Mills e che unificano leptoni con fotone, oltre ai vantaggi di portare a teorie rinormalizzabili dell'interazione debole e di confermare, come loro conseguenza, che la carica elettrica deve apparire sempre in unità quantizzata, hanno ottenuto recentemente notevole successo attraverso le evidenze sperimentali al Cern e a Batavia dell'esistenza del mesone vettoriale neutro intermedio delle interazioni deboli che esse prevedevano. A tali correnti bosoniche neutre pare si possa attribuire pure l'interazione coerente fra i neutrini e i nuclei di ferro nello stato esterno delle stelle supermassive, responsabile dell'esplosione delle supernovae. Altro risultato incoraggiante di tali teorie è stata la scoperta a Stanford e a Brookhaven, verso la fine del 1974, della particella a vita lunga J/ψ, particella vettoriale che è esprimibile come stato legato di un nuovo tipo di quark incantato e del suo corrispondente antiquark, per il fatto che tale quark incantato è necessario nelle teorie unificanti le interazioni debole ed elettromagnetica per sopprimere certi processi di corrente neutra mai osservati.

19. Da gloria passata, quale era divenuta nel periodo nucleare, oggi l'ottica è tornata alle frontiere della ricerca scientifica nelle condizioni di massima potenza tecnico-strumentale consentita ai nostri giorni. Campi quali l'ottica non lineare, l'olografia, le comunicazioni in onde luminose, hanno aperto un mondo di possibilità tecnologiche interamente nuove in quest'epoca contrassegnata principalmente dallo sviluppo esplosivo delle telecomunicazioni. Tale sviluppo è destinato a sconvolgere a livello mondiale tutti gli strumenti d'informazione e gli spazi tradizionali di relazione, e di conseguenza tutto il quadro delle relazioni sociali.

20. Oltre che mediante l'intensità e il colore, la luce può trasmettere informazione mediante variazioni della sua fase e/o del suo stato di polarizzazione. La fase di un'onda è legata all'istante iniziale in cui la luce viene emessa e al punto dello spazio in cui è situata la sorgente elementare in tale istante. La polarizzazione della luce è conseguenza della sua natura di vibrazione trasversale, conseguenza dell'invarianza di calibro del suo campo elettromagnetico, le cui due componenti, elettrica e magnetica, sono ortogonali fra loro e alla direzione di propagazione. Tale polarizzazione è convenzionalmente individuata dal comportamento del piano in cui vibra il campo elettrico, piano che può restare fisso (polarizzazione lineare), ruotare (polarizzazione ellittica) o variare a caso (luce non polarizzata). Fra gli infiniti stati possibili di polarizzazione della luce, quelli fra loro indipendenti non possono essere in numero maggiore di due. Tra queste coppie di stati indipendenti di polarizzazione, la coppia comprendente i due stati di polarizzazione circolare destrorsa e sinistrorsa rispettivamente è quella che direttamente si collega (nella traduzione onda-particella) alle due possibili direzioni, parallela o antiparallela alla direzione dell'impulso, nelle quali si orienta il momento angolare (spin 1) del fotone.

L'occhio umano, cosí come la maggior parte degli strumenti ottici, non è sensibile alla polarizzazione e alla fase della luce. D'altronde la luce del Sole non è polarizzata (cioè la sua polarizzazione varia a caso) ed è incoerente (cioè la sua fase varia a caso) e quindi nessuna informazione potrebbe trarsi analizzando la polarizzazione o la fase della luce solare. In effetti le cose non stanno esattamente cosí: l'atmosfera polarizza parzialmente la luce del Sole e recentemente è stato dimostrato che alcuni insetti, muniti di occhi sensibili alla polarizzazione, sfruttano l'informazione associata a questa polarizzazione parziale della luce del cielo per il loro orientamento. Pare che anche i Vichinghi, durante le loro leggendarie navigazioni, usassero per orientarsi cristalli di tormalina per rilevare tale polarizzazione parziale della luce del cielo. La tormalina infatti è una delle sostanze naturali capaci di selezionare, della luce che le attraversa, quella parte polarizzata in un piano ben determinato dall'orientamento particolare presente nella loro struttura. Esistono inoltre in natura sostanze otticamente attive, in grado di ruotare il piano di polarizzazione d'una luce polarizzata linearmente (sostanze levogire e destrogire). Altre sostanze, dette birifrangenti, sono otticamente anisotrope come conseguenza della simmetria anisotropa del loro reticolo. In esse cioè la luce ha velocità di fase diversa secondo la direzione di propagazione e di conseguenza in un fascio di luce polarizzato linearmente, che investe la sostanza, le due componenti lineari ortogonali, in fase all'ingresso, si sfasano lungo il percorso, dando in uscita luce polarizzata ellitticamente. È possibile indurre birifrangenza in un materiale otticamente isotropo applicandovi opportuni campi elettrici (effetto Pockels e Kerr) o magnetici (effetto Faraday). Si realizza in tal modo un modulatore elettroottico dentro il quale lo stato di polarizzazione della luce viene modificato a piacere da un segnale applicato. Tali modulatori elettroottici hanno oggi applicazioni notevoli nel campo della trasmissione delle informazioni, nella elaborazione dei dati e nella tecnologia dei calcolatori analogici e digitali.

21. Solo negli anni '60, con l'invenzione del laser, si è finalmente avuta a disposizione una sorgente di luce monocromatica e coerente ed è quindi stato possibile trasmettere informazione modulando la fase di un'onda luminosa. Una delle applicazioni piú suggestive e promettenti di questa invenzione è la olografia: con tale tecnica è possibile immagazzinare su di una stessa lastra fotografica sia l'informazione portata dall'intensità sia quella portata dalla fase della luce coerente di un laser. In tal modo si può ricostruire integralmente il fronte d'onda riflesso da un oggetto qualsiasi e ottenerne cosí un'immagine tridimensionale. Paradossalmente, come spesso accade nella storia del pensiero scientifico, l'invenzione del laser non nacque dall'ottica, bensí da un'area della fisica molto differente. Tra gli anni '40 e '50 alcuni ricercatori, che lavoravano all'interno del grande programma sui radar, erano interessati alle interazioni tra molecole e microonde. Sebbene l'interesse principale della loro ricerca fosse una migliore comprensione di tali interazioni, c'era tuttavia la speranza di poter usare le mo-

lecole stesse come risonatori o addirittura come generatori di microonde o di onde ancora piú corte. Questa speranza fu realizzata con l'invenzione dei maser. Una forte emozione percorse il mondo dei fisici quando nel 1958 alcuni di tali studiosi, Schawlow e Townes negli Usa e Prochorov nell'Urss, suggerirono che un maser avrebbe potuto operare anche a frequenze ottiche. Nel 1960 il primo laser a rubino mandava il suo primo raggio di luce (Maiman) e si apriva una nuova era per l'ottica e la fisica intera. Infatti la fisica del laser coinvolge aree disparate come la statistica dei fotoni, le microsaldature, la spettroscopia non lineare, la interferometria, ecc. La radiazione emessa dal laser, infatti, ha proprietà diverse da qualsiasi radiazione luminosa prodotta da altre sorgenti. Tali caratteristiche possono essere riassunte in coerenza, monocromaticità, alta intensità e direzionalità, alta capacità di aggiustamento in frequenza e possibilità d'emissione in impulsi ultracorti della luce laser.

22. Il grado di coerenza della luce, emessa da una certa sorgente, è una misura della sua capacità di interferire con se stessa, cioè di produrre frange di interferenza ben distinguibili. Una luce bianca, cioè con spettro molto largo, non ha una buona coerenza: infatti, se viene immessa in un interferometro, le frange di interferenza prodotte da ogni singola componente spettrale si sovrappongono, creando cosí una figura di interferenza del tutto confusa. Una luce monocromatica è viceversa coerente.

D'altra parte una sorgente estesa (ad esempio una lampadina), anche se resa monocromatica con filtri opportuni, non produce buone frange di interferenza, poiché atomi situati in diversi punti della sorgente (del filamento nel caso della lampadina) emettono treni di luce a istanti diversi e scorrelati, di modo che non c'è correlazione di fase tra i diversi treni d'onda emessi. Una sorgente puntiforme è viceversa coerente. La coerenza di una sorgente monocromatica è detta temporale, quella di una sorgente puntiforme, spaziale. La luce laser ha un elevato grado di coerenza sia spaziale che temporale: ha coerenza spaziale poiché, a causa della emissione stimolata e non spontanea, gli atomi della sorgente laser emettono la luce tutti in fase tra loro, nello stesso istante; ha coerenza temporale poiché, essendo immessi in una cavità ottica risonante, gli atomi sono stimolati a emettere luce di frequenza ben determinata. L'alto grado di coerenza della luce laser è alla base di tutte le sue straordinarie proprietà, come la direzionalità, l'alta intensità, la monocromaticità. È possibile misurare sperimentalmente il grado di coerenza di un fascio di luce anche senza farlo passare in un interferometro, ma semplicemente osservando la distribuzione statistica dei fotoni nel fascio. Infatti oggi esistono rivelatori ottici (fotomoltiplicatori) in grado di rilevare il singolo fotoelettrone prodotto dal fotone incidente su di essi. È cosí possibile misurare direttamente l'intera statistica dell'emissione di una sorgente semplicemente contando le coincidenze di arrivo dei fotoni su fotomoltiplicatori dislocati in diversi punti dello spazio. Cosí la radiazione termica è caratterizzata da una distribuzione dei fotoconteggi del tipo di Bose-Einstein, mentre una radiazione perfettamente coerente è caratterizzata da una distribuzione di Poisson. La luce laser è intermedia tra questi due casi limite. I laser che oscillano in un solo modo

della cavità hanno una distribuzione di fotoconteggi del tipo di Poisson, con un rumore bianco del tipo *shot-noise*, mentre i laser multimodi (non agganciati in fase) mostrano un caratteristico eccesso di rumore e una distribuzione di fotoconteggi di tipo Bose-Einstein. Dal punto di vista del grado di coerenza, cioè delle funzioni di autocorrelazione, si dimostra che la radiazione termica (filtrata) è coerente solo al primo ordine, mentre la luce laser è coerente fino a un ordine elevato, ma non infinito. L'alto grado di coerenza spaziale del laser rende possibile, tra l'altro, la focalizzazione del suo raggio in una zona limitata solo dalla diffrazione. È cosí possibile ottenere elevate intensità anche con laser di modesta potenza di uscita. Spesso le intensità che cosí si raggiungono sono tali da far apparire la non-linearità del mezzo su cui il laser è focalizzato. L'alto grado di coerenza temporale, cioè l'alta monocromaticità del laser, rende possibile, fra l'altro, la realizzazione di interferometri lunghi diversi chilometri, anche se le turbolenze atmosferiche sono un problema non sempre superabile. Impieghi di interferometri a laser nel campo della geologia (individuazione di microsismi) e dell'ingegneria (controllo delle deformazioni di dighe, ecc.) sono di grande attualità. Altra applicazione assai promettente è quella dell'olografia e delle tecniche di elaborazione ottica coerente dei dati.

23. Il rapido sviluppo che ha caratterizzato l'ottica nel secolo scorso e all'inizio di questo secolo è sicuramente legato al fatto che le equazioni che governano l'interazione fra la luce e la materia (atomi, molecole) potevano considerarsi con ottima approssimazione lineari. Questo fatto ci è suggerito dalla diretta esperienza che due raggi di luce passanti attraverso un qualunque materiale trasparente (vetro o aria ad esempio) si propagano indipendentemente l'uno dall'altro. Naturalmente questo comportamento lineare della materia è solo una prima approssimazione dovuta essenzialmente alla debolezza relativa dei campi elettrici e magnetici della luce generata da sorgenti ordinarie, rispetto agli intensi campi elettrici inframolecolari. Dopo l'invenzione del laser, si sono avute a disposizione sorgenti tanto intense da essere paragonabili a tali campi inframolecolari. Si sono cosí potuti osservare anche nel campo ottico fenomeni tipicamente non lineari come la saturazione, la creazione di armoniche, l'amplificazione parametrica, il mescolamento di frequenze, gli effetti Raman e Brillouin stimolati, e infine il *break-down* ottico.

Già prima dell'invenzione del laser si sapeva che forti campi elettrici possono indurre birifrangenza in materiali normalmente isotropi (effetti elettroottici Kerr e Pockels) e lo stesso effetto Raman (l'apparizione cioè di nuove frequenze, caratteristiche del mezzo, sia maggiori sia minori della frequenza dell'onda incidente) fu scoperto nel 1928, molti anni prima della comparsa del laser. Comunque i fenomeni non lineari avevano avuto fino allora una scarsa importanza nell'ottica. Viceversa in altri campi della scienza e della tecnica i fenomeni non lineari hanno un ruolo essenziale: ad esempio nell'elettronica tutta una serie di fenomeni come la rettificazione, la modulazione, l'eterodina, il mescolamento di frequenze, la generazione di armoniche, sono dovuti alla risposta non lineare dei tubi a vuoto o dei transistor. Inoltre effetti non lineari sono ben noti in acustica,

e ben lo sanno gli appassionati dell'alta fedeltà. La famosa «distorsione di intermodulazione», la bestia nera dell'HiFi, è una conseguenza del mescolamento di frequenze dovuto alla non-linearità del pick-up, dell'amplificatore o delle casse acustiche. Anche l'orecchio umano ha una risposta non lineare e si hanno in esso battimenti fra note di diversa frequenza; ma siccome tali distorsioni sono percepite anche nella sala da concerto, ci paiono realistiche e anzi piacevoli. L'alta intensità di luce ottenibile focalizzando un laser ha permesso di ottenere tutti questi fenomeni non lineari anche nella banda ottica. La stessa teoria dei circuiti elettronici non lineari è stata trasportata in ottica anche se qui, essendo le dimensioni degli apparati piú grandi della lunghezza d'onda, diventano importanti i fenomeni di propagazione.

24. L'intensità (potenza per unità di superficie) della luce laser può essere di diversi ordini di grandezza maggiore della piú intensa luce emessa da una sorgente convenzionale. Infatti la coerenza spaziale propria della luce laser fa sí che tutti i raggi luminosi possono essere focalizzati in un unico punto le cui dimensioni sono inferiormente limitate solamente dalla diffrazione di Airy. Si ottengono in tal modo concentrazioni di potenza eccezionali. Per fare un esempio la brillanza (potenza per unità di superficie e unità di angolo solido) del Sole è di $2{,}3 \cdot 10^{-3}$ MW/cm^{2}sr, quella di una lampada al mercurio, è di $5 \cdot 10^{-4}$, nelle stesse unità, mentre quella di un modestissimo laser a elio-neon da 50 mW di potenza di uscita è di 12,5, cioè circa 6000 volte piú alta del Sole! Quando si concentrano tali potenze su un materiale (un raggio laser visibile di 100 MW/cm^2 produce un campo elettrico di 100 000 V/cm!), il materiale stesso ne viene modificato, a volte anche in modo irreversibile. A volte la sollecitazione può essere talmente forte da rompere o fondere il materiale stesso. Il raggio non focalizzato di un laser continuo a CO_2 può bruciare con una sola fiammata un'asse di legno o tagliare una lamiera in pochi secondi. È tecnicamente ancora piú facile ottenere grandi potenze di uscita in regime impulsivo. Potenze istantanee dell'ordine di centinaia di megawatt sono cosí facilmente ottenibili in impulsi di circa 20 nanosecondi di durata. Applicazioni immediate di queste capacità «distruttive» della luce laser focalizzata sono state effettuate nel campo delle microsaldature, del taglio delle gemme, della fabbricazione di circuiti integrati, della microchirurgia (fotocoagulatori) e infine è stato proposto l'uso di laser di altissima potenza per la generazione di un plasma abbastanza caldo da consentire la fusione nucleare controllata. A livelli di intensità piú modesti, tali cioè da non danneggiare il materiale in esame, è possibile indurre modificazioni (non permanenti) in esso, di modo che è possibile osservare effetti ottici dovuti alla non-linearità della risposta del mezzo. Ad esempio un'intensa luce laser è in grado di modificare l'indice di rifrazione dei materiali attraverso cui passa, allineando le sue molecole, comprimendo il materiale stesso oppure producendo altri fenomeni. In seguito a queste modificazioni le stesse onde monocromatiche del laser possono subire distorsioni e possono generarsi cosí onde armoniche di frequenza doppia o tripla. Inoltre producendo variazioni nell'indice di rifrazione, la luce laser può amplificare gli effetti Brillouin (diffusione da fononi acustici) o Raman (diffusione

da fononi ottici), di modo che al di sopra di una certa soglia si ha una forte emissione coerente di luce alle frequenze Stokes e Antistokes (effetti Brillouin e Raman stimolati). Con la produzione di armoniche, il mescolamento di frequenze e gli effetti Raman e Brillouin stimolati è possibile ottenere sorgenti di luce coerente e monocromatica a nuove frequenze. Un fatto curioso è che la produzione di armoniche e la stimolazione di diffusione Raman e Brillouin avvengono per intensità del laser molto al di sotto della soglia prevista da un primo approccio teorico. Questo fatto dipende da un processo di autofocalizzazione del raggio laser nel mezzo. Il fenomeno è dovuto a una modificazione locale dell'indice di rifrazione del mezzo cosí che il materiale si comporta come una specie di lente convergente. Tale processo continua fino a che l'effetto focalizzante viene bilanciato dalla diffrazione e il raggio iniziale si spezza in un grande numero di raggi filiformi che proseguono con diametro costante (fenomeno del *self-trapping*). Applicazioni di questi fenomeni sono sparse in tutti i campi della scienza e della tecnica, in particolar modo nella spettroscopia che, usufruendone, raggiunge oggi sensibilità di rivelazione altissime. È questo il caso della spettroscopia di saturazione, il cui potere risolutivo è di diversi ordini di grandezza superiore a quello degli ordinari metodi spettroscopici: con essa è possibile misurare righe spettrali di larghezza fino a 6 KHz, con una risoluzione quindi maggiore di 10^{10}. Tale tecnica è stata impiegata per risolvere gli spettri di isotopi, la separazione iperfine dei livelli energetici, la struttura fine dovuta alle rotazioni molecolari. La precisione risulta tanto elevata che ha permesso di ottenere un valore migliore della costante di Rydberg e una verifica migliore dello spostamento di Lamb. Questa spettroscopia di saturazione si fonda sul fatto che, se la luce laser è abbastanza intensa, essa eccita fortemente quelle molecole la cui frequenza di transizione è in risonanza con quella del laser sí da equipopolare i due livelli tra i quali avviene la transizione (fenomeno di saturazione) e provocare perciò una forte riduzione dell'assorbimento a quella frequenza. Ad esempio, nel caso dei gas, le molecole in moto per l'agitazione termica vedono, per effetto Doppler, la frequenza della luce laser leggermente spostata e in funzione della loro velocità. Ne risultano pertanto saturate solo le molecole con velocità tale da vedere la frequenza laser in risonanza con la propria frequenza di transizione. Si realizza cosí in pratica un vero e proprio diavoletto di Maxwell che seleziona le molecole con una certa velocità, e altera cosí la distribuzione statistica complessiva delle velocità delle molecole introducendo in essa una buca molto sottile che può essere impiegata come rivelatore ad alta risoluzione o come forte stabilizzatore di frequenza.

25. La direzionalità del laser è strettamente legata alla sua coerenza spaziale; la divergenza di un fascio laser è determinata infatti dalla sola diffrazione e si possono ottenere divergenze di 10^{-8} steradianti o meno ancora. L'applicazione piú semplice della direzionalità del fascio laser è l'allineamento di strutture. Esempi notevoli sono stati l'allineamento delle chiatte, equipaggiate con draghe e altre attrezzature, impiegate nel 1966 per la costruzione della sottovia tra San Francisco e Oakland (in tale progetto furono impiegati ben dodici laser a

elio-neon; dopo un percorso di due chilometri e mezzo il fascio di luce misurava appena venti centimetri di diametro), o l'allineamento dell'acceleratore lineare di Stanford in cui era richiesta una precisione di $\pm 0{,}5$ millimetri a 3 chilometri di distanza. Un'altra notevole applicazione è quella della misurazione precisa di distanze (telemetria). Con laser impulsati da 1 nanosecondo o addirittura da 1 picosecondo (10^{-12} sec) è possibile misurare grandi distanze, misurando l'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante di emissione dell'impulso laser e l'istante di ricezione dell'eco. L'esempio piú sconvolgente di tale tecnica è senza dubbio la misurazione della distanza Terra-Luna con l'approssimazione quasi incredibile di 15 centimetri! Questa esperienza di telemetria è stata effettuata nel luglio del 1969 con il retroriflettore installato sulla Luna dagli astronauti dell'Apollo 11. I dati forniti da questo retroriflettore sono stati utilissimi nei rami piú svariati della ricerca: per fare un esempio, nel campo della geofisica è stato possibile misurare la posizione del Polo nord della Terra con uguale precisione e osservarne gli spostamenti, mentre nel campo della fisica fondamentale è stato possibile avere una conferma del principio di equivalenza tra massa inerziale e gravitazionale della relatività generale, e ci si aspetta di poter osservare un'eventuale diminuzione secolare del valore della costante di gravitazione universale, prevista da qualche teoria cosmologica.

26. Oggi si possono avere laser la cui frequenza può essere aggiustata con continuità su una vasta banda, il che consente di regolare la frequenza dell'onda emessa da un laser dye in modo da eccitare un atomo o una molecola in esatta risonanza con una sua transizione, aprendo cosí un interessante nuovo capitolo della spettroscopia ottica. È stato possibile osservare fenomeni del tutto nuovi come la nutazione ottica, l'eco di fotoni, la trasparenza autoindotta e la superradianza. È degno di nota il fatto che per spiegare tali fenomeni risonanti la usuale teoria delle perturbazioni non è piú sufficiente, e sono state messe a punto tecniche matematiche molto raffinate che, inizialmente nate dall'ottica, hanno permesso di scoprire soluzioni per una vasta classe di equazioni non lineari di evoluzione come l'equazione di seno-Gordon, l'equazione di Korteweg - De Vries, di Benney-Newell e di altre ancora, formulate per quei problemi non lineari o di risonanza che oggi urgono sempre piú numerosi in fisica e in particolare nella ricerca interdisciplinare di avanguardia. Cosí nello studio dell'interazione non lineare del campo elettromagnetico in risonanza con il campo atomico vibrante, si sono trovate soluzioni simultanee delle equazioni accoppiate di Maxwell e di Bloch ottiche, soluzioni di tipo impulsivo, alcune delle quali, dette solitoni, si comportano come stati di legame del sistema e sono stabili nel senso che corrispondono a impulsi luminosi che si propagano senza attenuazione e senza distorsione nel mezzo, che peraltro è fortemente assorbente, essendo in risonanza con la radiazione incidente. Ciò che succede è che, quando arriva l'impulso, gli atomi assorbono energia, eccitandosi a loro volta, per poi restituirla interamente al campo elettromagnetico, comportandosi in maniera analoga a un pendolo che compia un giro completo attorno al suo perno. Il risultato finale è che l'impulso si propaga indisturbato come se il mezzo fosse trasparente (trasparenza autoindotta). Un altro campo di ricerca estremamente interessante e tuttora in via di sviluppo nel campo della spettroscopia atomica e molecolare e della fisica e chimica dello stato solido, è quello della propagazione di impulsi luminosi ultracorti nella materia. Oggi infatti si possono avere laser agganciati in fase, in grado di emettere impulsi della durata di pochi picosecondi. Tali durate sono dello stesso ordine di grandezza dei tempi di rilassamento atomici (dei tempi cioè in cui un atomo o molecola compie una transizione da uno stato a un altro). È cosí possibile osservare direttamente, e nella maggior parte di atomi e molecole, fenomeni di transiente, che si erano finora potuti osservare solo in certi casi particolari in cui la transizione avveniva a partire da uno stato metastabile, come nei fenomeni di fosforescenza. È notevole il fatto che impulsi di durata tanto breve non si possono ottenere nemmeno con le tecniche oggi avanzatissime dell'elettronica, per cui i laser agganciati in fase sono l'unico mezzo noto finora con cui è possibile osservare direttamente fenomeni che avvengono in queste scale ridottissime di tempo. In conclusione si può dire che oggi anche l'ottica non lineare è uscita dalla fase pionieristica e che scoperte di nuovi effetti non lineari appaiono improbabili, mentre la conoscenza dei vecchi viene approfondita al massimo grado.

L'interesse della ricerca si sta spostando verso l'ingegneria, cioè verso la scoperta di nuovi materiali ad alta risposta non lineare, verso la messa a punto di nuove tecniche sempre piú raffinate e la individuazione di nuove applicazioni che probabilmente avranno una grande influenza su tutta la tecnologia dell'immediato futuro. [R. A. e E. S.].

Polvani, G.
1934 «Luce», in *Enciclopedia Italiana*, vol. XXI, Istituto della Enciclopedia Italiana, Milano, pp. 566-74.

La luce solare ha costituito la piú importante sorgente di **energia** ordinata per il mondo **vegetale** durante le sue prime fasi di formazione, ed è anche la piú importante sorgente di **informazione** che si abbia sul mondo esterno, attraverso un recettore eccezionalmente perfetto: l'occhio. L'occhio, assieme alla dimensione del **cervello**, è forse il principale responsabile della posizione privilegiata dell'uomo, ed alla particolarità della **visione** è connaturata la **percezione** del **reale**.

Lo studio della luce e della sua natura – oggetto da sempre del pensiero filosofico (cfr. **filosofia/filosofie**) – ha avuto un'enorme importanza per lo sviluppo sia della tecnologia sia della **scienza** (cfr. anche **modo di produzione**). Gli strumenti ottici (cfr. **strumento**), estendendo la capacità visiva dell'uomo, hanno permesso di indagare la struttura della **materia** inerte e vivente (cfr. anche **cellula**, **natura**, **vita**), di osservare e seguire il **moto** degli astri e dell'**universo** (cfr. anche **astronomia**, **cosmologie**, **osservazione**, **spiegazione**).

La luce era il problema fondamentale della scienza **fisica** verso la fine del secolo scorso, e le principali vicissitudini successive sono intimamente legate allo studio della **pro-**

pagazione della luce, cosí come la geometria euclidea (cfr. **geometria e topologia**) era legata prevalentemente ad esperienze ottiche.

I **quanti** e la **relatività** (cfr. anche **spazio/tempo**) si legano infatti intimamente alla teoria di Rayleigh-Jeans e all'esperienza di Michelson-Morley (cfr. anche **empiria/esperienza, atomo e molecola, particella**). Va osservato poi che le nuove teorie fisiche, ove la luce e la sua velocità hanno un posto centrale, pongono in primo piano importanti problemi filosofici, quali i rapporti di **causa/effetto** e di **determinato/indeterminato**.

L'elettrodinamica quantistica deve però i suoi successi anche all'uso di raffinati strumenti di **calcolo**, quali la teoria della perturbazione (cfr. anche **differenziale**). Ma l'uso e la creazione di concetti matematici profondi sono caratteristici di tutto lo sviluppo della fisica attuale (cfr. anche **invariante, applicazioni, continuo/discreto, dipendenza/indipendenza, dualità**).

Con l'attuale potenziamento delle tecniche strumentali, l'ottica è tornata alle frontiere della ricerca scientifica. Allo studio del comportamento lineare della materia, come prima **approssimazione**, si possono ora sostituire studi piú raffinati ed esaustivi. La straordinaria potenzialità del laser e l'interesse della ricerca che si sta spostando verso la scoperta di nuovi materiali ad alta risposta non lineare sembrano indicare una prima fase di cambiamenti importanti anche a livello sociale.

Materia

1. *Prime speculazioni degli antichi sulla materia.*

L'importanza del concetto di 'materia' nel pensiero scientifico e filosofico è dimostrata dal fatto che la filosofia occidentale nasce circa venticinque secoli fa con le speculazioni dei filosofi ionici sulla natura della materia. Da allora il concetto di materia ha subito profonde variazioni, a seconda che venisse pensato come uno dei termini di una «coppia filosofica», di cui l'altro era, a seconda dei casi, 'forma', 'spirito', 'forza' (o 'energia') e anche 'numero'. Tuttavia esso ha mantenuto una certa costanza di significato, indicando l'elemento stabile, solido, permanente della realtà, il supporto primario e passivo di qualità sensibili. Perciò la materia è sempre considerata *ex hypothesi* eterna e indistruttibile.

L'esigenza di scoprire un'unità nella diversità delle cose suggerisce ai primi filosofi di identificare la «materia primaria» con l'acqua (Talete), con l'aria (Anassimene), o con il fuoco (Eraclito); mentre in Anassimandro essa rimane una sostanza non identificabile con quelle conosciute (l'ἄπειρον 'l'indeterminato').

Nella scuola fondata a Taranto da Pitagora gli elementi etico-mistici presenti anche in Eraclito sono preminenti. Secondo la dottrina pitagorica, il principio unitario e primordiale è il «numero». Non è ben chiaro come per i pitagorici i numeri (interi) generassero gli oggetti reali; sembra che essi pensassero le cose come formate da punti o «unità di realtà», molto piccoli e uguali fra loro, preludendo cosí alla dottrina degli atomisti. Ciò condusse, però, alla famosa «crisi degli irrazionali», che portò alla dissoluzione della setta politico-religiosa dei pitagorici, benché una scuola filosofica continuasse a Taranto fino all'epoca di Platone, sul cui pensiero Pitagora esercitò un influsso molto importante.

Brevemente, se ogni linea è formata da un numero intero di punti, il rapporto tra due segmenti qualunque, per esempio tra la diagonale e il lato di un quadrato, è un numero razionale; ma questo rapporto è uguale alla radice quadrata di 2 ed è noto che non esiste nessun numero razionale, il cui quadrato sia esattamente uguale a 2. La teoria dei numeri irrazionali trovò una sistemazione definitiva solo alla fine del secolo scorso, ad opera di Weierstrass, Cantor, Dedekind ed altri matematici; ma prima di allora era necessario accettare l'esistenza di numeri, su cui si poteva operare come sui numeri razionali, ma non potevano essere rappresentati esattamente dal rapporto di due numeri interi. Con ciò la base della dottrina pitagorica veniva meno e – tra l'altro – questa fu una delle ragioni per cui in Europa la geometria ebbe una preferenza sulle altre discipline matematiche.

Con la crisi pitagorica si manifesta per la prima volta il dualismo tra il «continuo» e il «discreto» nella descrizione della realtà, che in una forma o nell'altra apparirà in tutte le teorie della materia; nel secolo XVIII sarà per Kant la seconda delle antinomie razionalmente insolubili. (Secondo conflitto delle idee tra-

scendenti. Tesi: la materia composta è formata di atomi indivisibili. Antitesi: la materia è divisibile all'infinito).

Il primo tentativo di risolvere questa antinomia in favore di una delle due proposizioni in conflitto fu quello della scuola di Elea, nell'Italia meridionale, che ebbe in Parmenide il suo maggiore rappresentante. La posizione degli eleati è quella di un razionalismo estremo, che assume aspetti paradossali nel respingere come illusione qualunque variazione o divenire, incluso il movimento. La ragione ci assicura che il Reale è Uno e immobile; il Mondo è un *plenum* rigorosamente continuo; il vuoto semplicemente «non è». Nel rifiutare la pluralità e il moto, gli eleati «non negano naturalmente che noi percepiamo moto e pluralità, ma dichiarano che ciò che percepiamo è illusione, mera apparenza» [Copleston 1946, ed. 1962 I, p. 76]. Questo è il significato dei famosi «sofismi» di Zenone riguardo al moto.

Molto piú vicini al naturalismo ionico sono gli altri due grandi filosofi presocratici, Empedocle e Anassagora. La dottrina di Empedocle dei «quattro elementi» perdurerà per molti secoli, specialmente nella versione che ne dà Platone nel *Timeo*; questa sembra provenire da Filolao, un tardo pitagorico, noto anche per il suo sistema astronomico che, primo nell'antichità, poneva la Terra fuori dal centro del mondo. Le quattro «radici» delle cose – non si parla ancora di «atomi» – sono associate ai solidi regolari: la terra al cubo, l'acqua all'icosaedro, l'aria all'ottaedro, il fuoco al tetraedro; il quinto solido, il dodecaedro, è la raffigurazione dello «sfero», cioè della fusione perfetta dei quattro elementi, che esisteva all'inizio e si raggiungerà di nuovo alla fine dei secoli. Perché il ciclo cosmico possa compiersi, sulla materia, per sé stessa inerte, devono agire due principî attivi, l'«amore» e l'«odio»; malgrado i loro nomi, questi sono principî fisici, cioè «forze» che tendono a riunire e a separare gli elementi. Cosí, nella fisica empedoclea, per la prima volta compare una distinzione tra due principî: uno passivo (materia) e uno attivo (forza o energia), entrambi necessari per una descrizione della realtà.

La pluralità è spinta agli estremi nel sistema di Anassagora. Esistono infiniti principî («omeomerie») delle cose, perché «come potrebbe nascere capello da non-capello e carne da non-carne?» [Diels e Kranz 1951, 29, B.10]; vi sono, però, anche cose composte («anomeomerie») formate dall'unione di piú sostanze semplici, anzi in ogni cosa sono rappresentate tutte le altre, ma in misura maggiore quella che corrisponde alla cosa considerata. Anche Anassagora postula un principio attivo: la «Mente» o «Νοῦς»; ma questo è qualcosa di assai meno «fisico» che l'amore e l'odio empedoclei, significando la «facoltà analitica e discriminante del conoscere» ed ha quindi la funzione di «ordinamento, comprensione e controllo della realtà» [Geymonat 1970-72, I, pp. 90, 89]. D'altra parte, sembra che Anassagora pensasse il Νοῦς anche come una sostanza estremamente sottile, ma spazialmente estesa, che pervade tutto e ha potere su tutto, ma non si mescola con nulla, forse non dissimile dall'etere cartesiano o dal πνεῦμα degli stoici (cfr. l'articolo «Gravitazione» in questa stessa *Enciclopedia*).

2. *L'atomismo e la fisica aristotelica.*

Ben piú importante per l'evoluzione del concetto di materia è la dottrina degli atomisti: Leucippo e, soprattutto, Democrito. Purtroppo dei loro scritti quasi nulla è giunto sino a noi; sembra che nell'antichità gli atomisti e il loro piú tardo continuatore Epicuro siano stati oggetto di ostilità non solo da parte delle altre scuole filosofiche, ma anche del potere politico-religioso; «filosofi plebei» chiamerà con disprezzo Cicerone i discepoli di Epicuro, alludendo specialmente a Lucrezio che nel *De rerum natura* illustrò con toni artisticamente insuperati l'atomismo epicureo.

L'atomismo risolve l'antinomia «continuo/discreto» in senso opposto a quello degli eleati. È una dottrina fisica, che distingue tra enti geometrici (puramente razionali) e realtà sensibile; i primi si possono suddividere indefinitamente, ma la divisibilità fisica si arresta quando si sono raggiunte le particelle ultime o «elementari» di materia: gli «atomi» o «indivisibili». Il punto piú nuovo e ardito della fisica democritea è quello di pensare gli atomi (= materia) mobili nel «vuoto» (= non-materia): «Opinione è il colore, opinione il dolce, opinione l'amaro, verità gli atomi e il vuoto» [Diels e Kranz 1951, 68, B.125]. La contraddizione dialettica inerente all'idea di vuoto – tutto ciò che esiste è materia, per definizione; quindi la non-materia, il vuoto, non può esistere – costituirà fino all'epoca moderna un ostacolo pressoché insormontabile per filosofi e fisici; ancora nel secolo XVIII un grande fisico-matematico come Jean Bernoulli dirà parlando del vuoto che si tratta di un'ipotesi cosí ardita da ripugnare alle menti (cfr. ancora «Gravitazione»).

Gli atomi di Democrito e di Epicuro sono eterni, perché in natura nulla può sorgere dal nulla e dissolversi nel nulla; non ha senso chiedersi di che sono fatti gli atomi, ma le cose, con le loro proprietà sensibili, sono generate dai loro differenti raggruppamenti. Non è chiaro se gli atomi fossero immaginati tutti identici tra loro, indipendentemente dalla sostanza (ferro, bronzo, acqua, ...) delle cose; sembra però che Democrito pensasse a possibili differenze di forma, mentre appartiene a Epicuro l'idea che gli atomi si riuniscano prima in unità di ordine superiore (composti delle sostanze semplici), dalle quali si formano i corpi. Non si pensa ancora a «forze» che tengano uniti gli atomi; forse questi erano immaginati muniti di ganci e uncini, per assicurare la loro unione fino a che un'azione esterna non venga a separarli.

In principio gli atomi si muovevano nel vuoto – che è necessario appunto per consentire loro di muoversi – ma i moti non erano esattamente paralleli; da ciò nascono incontri, che originano differenti raggruppamenti. Queste deviazioni dal parallelismo dei moti sono casuali e fortuite, ma lo stato dell'universo è rigidamente determinato dallo stato anteriore. Il determinismo meccanico di Democrito non è però condiviso da Epicuro, secondo il quale invece gli atomi possiedono una certa libertà di scelta, necessaria per spiegare il libero arbitrio degli uomini.

Nella sua lunga vita, durata piú di un secolo, Democrito fu contemporaneo

di Socrate, di Platone e di Aristotele giovane, cioè dei filosofi dell'antichità che maggiormente influirono sullo sviluppo del pensiero occidentale. Mentre gli atomisti ed Epicuro concludono la corrente fisico-naturalistica della filosofia antica, con questi filosofi si afferma quell'indirizzo razionalistico iniziato da Pitagora e soprattutto dagli eleati, il quale, incorporato nella filosofia del cristianesimo, dominerà incontrastato per molti secoli nel pensiero filosofico e scientifico. È un modo diverso di collocarsi di fronte alla realtà, non una nuova teoria fisica; l'osservazione imparziale dei fenomeni naturali cede il posto alla logica deduttiva, nella convinzione che l'unica fonte di certezza si debba ritrovare in alcuni principî assunti dogmaticamente a priori, come necessità razionali o verità rivelate.

«La nostra ricerca, – scrive Aristotele [*Fisica*, 194b], – ha per fine la conoscenza e, d'altra parte, noi crediamo di non conoscer nulla se prima non abbiamo posto il perché di ciascuna cosa (e ciò significa porre la causa prima)». Dopo di che procede a enumerare i modi con cui viene impiegato il termine 'causa', cioè: la «forma» o causa formale, la «materia», la «causa efficiente» e la «causa finale». Si vede da questa enumerazione che la parola 'causa' (αἰτία) ha per Aristotele un significato profondamente diverso da quello che ha nel linguaggio scientifico moderno. «Materia» è tutto ciò per mezzo di cui può realizzarsi una «forma»: un pezzo di legno possiede, come tutto ciò che esiste, materia e forma, ma nella esemplificazione della teoria aristotelica esso è la «materia» (informe), da cui un falegname (la «causa efficiente») ricaverà un oggetto, per esempio una panca; nell'oggetto egli realizza o attua la «forma» (della panca) per lo scopo («causa finale») che si è proposto. Il problema che interessa Aristotele non è tanto quello della struttura del legno, di come sono disposte le fibre, della sua composizione chimica, ecc, quanto quello di sapere se la forma o l'idea della panca esisteva (nel pezzo di legno o altrove) prima che il falegname la fabbricasse, cioè prima di passare da «potenza» ad «atto».

Anche la dottrina aristotelica del moto ha lo stesso carattere astratto. Vi sono quattro tipi di «movimento» – inteso come sinonimo di «variazione» o «cambiamento» – e cioè: «alterazione» o cambiamento di qualità, «aumento» o «diminuzione» o cambiamento di quantità, «creazione» o «distruzione» e, infine, «movimento» (propriamente detto) o cambiamento di luogo; ognuno di questi consiste nell'attuarsi di qualche cosa che già esisteva in potenza.

Gli «elementi» o «principî» (ἀρχαί) dei corpi non sono i quattro elementi empedoclei, ma quelle che Aristotele considera le quattro qualità elementari, divise in due coppie di contrari: «caldo» e «freddo», «umido» e «secco», che possono combinarsi in quattro coppie possibili, da cui derivano i quattro corpi o sostanze elementari: quelli che vengono chiamati comunemente elementi. «Il fuoco, infatti, è caldo e secco, l'aria è calda e umida (giacché essa è una sorta di vapore), l'acqua è fredda e umida, la terra è fredda e secca» [*Generazione e corruzione*, 330b].

È chiaro che tutto questo gran parlare di materia e forma, potenza e atto, in realtà non dice nulla sulla natura della materia e del moto; perciò questa dottrina è qui riportata unicamente perché l'attitudine aristotelica verso la conoscenza ha dominato incontrastata per quasi venti secoli. Aristotele ha, però, anche una teo-

ria fisica del moto; esistono due tipi di moti: moti «naturali» e «moti violenti». I primi sono propri della natura dei corpi, come il moto dei corpi pesanti verso il basso, quello del fuoco verso l'alto e quello circolare dei corpi celesti; gli altri sono dovuti a cause esterne: la mano che scaglia la pietra, l'arco che fa scoccare la freccia. Nel caso di moti violenti, il fatto che il corpo continua a muoversi anche dopo cessata la causa che ha iniziato il moto – come la freccia che continua verso il bersaglio dopo lasciato l'arco – si deve a una spinta del mezzo che si richiude dietro il corpo che si muove.

Questa teoria del moto – messa in ridicolo da Galileo, ma già discussa nel medioevo – serve ad Aristotele come argomento contro il vuoto, perché nel vuoto il moto dei corpi sarebbe impossibile, mancando la spinta del mezzo. Ma l'argomento principale è sempre quello che il vuoto privo di materia non può esistere, perché tutto ciò che esiste è per definizione materia. Perciò Aristotele si dichiara d'accordo con Platone, quando «dice nel *Timeo* che la materia e lo spazio sono la medesima cosa» [*Fisica*, 209b]. In altre parole, la funzione della materia, ridotta a pura estensione, è quella di essere il substrato spazio-temporale (esteso e durevole) delle coppie di qualità elementari.

Dopo gli atomisti e Aristotele la scienza greca registra un regresso nel campo della fisica, rimanendo per qualche tempo in fiore solo la matematica (specialmente la geometria) e l'astronomia. Per qualche motivo la filosofia occidentale perde interesse nel mondo della natura; il fine della ricerca non è piú quello di conoscere l'interdipendenza dei fenomeni naturali per soddisfare una curiosità intellettuale disinteressata o ricavarne vantaggi pratici, ma quello di cercarne una spiegazione metafisica. Naturalmente ciò non avviene da un giorno all'altro; lo stesso Aristotele fu anche uno scienziato pratico – soprattutto nel campo della biologia e della medicina – e afferma ripetutamente l'importanza dell'esperienza. Nel campo della fisica applicata sono giustamente ammirate le invenzioni di Archimede e di Erone; ma il fatto stesso che di quest'ultimo non si sa neppure se sia vissuto prima o dopo Cristo dimostra il poco conto in cui queste realizzazioni erano tenute nell'antichità. Come caratteristico dell'attitudine dell'epoca, si può citare il seguente passo delle *Vite parallele* di Plutarco: «Archimede possedette tuttavia uno spirito cosí elevato, un'anima cosí profonda e un patrimonio cosí grande di cognizioni scientifiche, che non volle lasciare per iscritto nulla su quelle cose, cui pure doveva un nome e la fama di una facoltà comprensiva non umana, ma pressoché divina. Persuaso che l'attività di uno che costruisce delle macchine, come di qualsiasi altra arte che si rivolge a un'utilità immediata, è ignobile e grossolana, rivolse le sue cure piú ambiziose soltanto a studi la cui bellezza ed astrazione non sono contaminate da esigenze di ordine materiale» [*Vita di Marcello*].

Anche le teorie fisiche degli stoici presentano qualche spunto di notevole interesse. In opposizione decisa alla scuola epicurea, gli stoici assumono la continuità della materia, ma introducono un principio attivo, derivato forse dal Νοῦς di Anassagora: il πνεῦμα o «spirito», che prelude alla dottrina dell'etere, veicolo delle interazioni tra i corpi; è il πνεῦμα che conferisce alla materia il τόνος o tensione, da cui dipendono le sue proprietà sensibili. Vi è anche una certa analogia

tra il πνεῦμα e la nozione moderna di «energia» (cfr. anche il citato articolo «Gravitazione» in questa stessa *Enciclopedia*).

Comunque negli ultimi secoli avanti Cristo si assiste a un graduale impoverimento della ricerca scientifica; la sperimentazione è condotta in maniera superficiale; fatti, che si sarebbero potuti facilmente controllare con poca fatica anche con i mezzi rudimentali dell'epoca, vengono accettati in forma acritica, mentre si insiste quasi esclusivamente sull'aspetto logico o metafisico della conoscenza. Ciò perdurerà fino al Rinascimento.

3. *Il medioevo e gli inizi della scienza moderna.*

Nei primi secoli dopo Cristo, il generale decadimento della ricerca originale conduce a due fenomeni caratteristici: «La ricerca si sposta... verso altri campi (magia, alchimia, astrologia) in cui gli elementi fideistici e mistici prevalgono di gran lunga su quelli razionali» e «predomina... un tipo di letteratura manualistica ed enciclopedica che tende piú che altro a volgarizzare i dati conseguiti nelle singole scienze» [Micheli 1970, p. 344]. Questi elementi mistici e moraleggianti si ritrovano anche nella filosofia della tarda antichità, tipicamente nel neoplatonismo di Plotino, in cui la natura del mondo si può riassumere nel parallelismo

essere → essenza → forma → bene
non-essere → substrato → materia → male

[*Enneadi*, I, 8]. Gli accostamenti materia ⇔ male e spirito (forma) ⇔ bene, sono caratteristici del medioevo, mentre le teorie fisiche e lo studio dei fenomeni sono tenuti in poco conto. Tuttavia la dottrina fisica dell'*impetus* del neoplatonico Giovanni Filopono avrà una notevole importanza nello sviluppo della meccanica verso la fine del medioevo. Non si deve neanche sottovalutare l'apporto dell'alchimia alla conoscenza della materia, come quello dell'astrologia all'astronomia. Malgrado il carattere esoterico delle loro dottrine, gli alchimisti accumularono nel corso dei secoli un'enorme quantità di dati, separando e classificando sostanze semplici e composte, riconoscendo affinità chimiche e altre proprietà; queste nozioni puramente empiriche e le rispettive tecnologie saranno preziose quando diverrà possibile riunirle in un corpo coerente di dottrine razionali.

Il risveglio del pensiero scientifico si inizia in Europa intorno al XIII secolo; non a caso questa è anche l'epoca in cui si afferma una nuova società artigiana e borghese nei liberi comuni d'Italia, Germania e delle Fiandre e in cui le Crociate e i primi viaggi d'esplorazione ristabiliscono i contatti con il mondo orientale. Le università di Bologna e Padova, di Parigi, di Oxford divengono centri di fermento intellettuale, in cui si discutono con notevole indipendenza di opinioni le dottrine degli antichi, specialmente di Aristotele – trasmesse soprattutto attraverso le versioni e commenti degli Arabi. Manca ancora, è vero, una sperimentazione sistematica e critica, ma l'interesse per la scienza sperimentale da parte di Roberto Grosseteste e specialmente del suo allievo Ruggero Bacone a Oxford denota una stupefacente modernità; la scuola di Parigi, iniziata con Alberto Ma-

gno, maestro di Tommaso d'Aquino, compie un'opera di grande importanza per la rinascita della scienza nel volgarizzare la filosofia aristotelica, inclusa la *Fisica*, per conciliarla con il cristianesimo. È questo il momento piú originale della Scolastica.

Verso la fine del XIII secolo, anche le idee degli atomisti e specialmente la possibilità del vuoto sono riprese e discusse – sia pure alla fine per rifiutarle – da Bacone, Duns Scoto e Bradwardine. Le considerazioni sull'azione a distanza di Guglielmo di Ockham, uno dei pensatori piú originali e indipendenti di tutti i tempi, benché solo indirettamente legate al tema di questo articolo, meritano di essere qui ricordate per l'influenza che esercitarono in epoche successive, al pari delle discussioni sul moto di Bradwardine e dei francesi Giovanni Buridano e Nicola d'Oresme.

Questo risveglio d'interesse per la scienza subisce però una battuta d'arresto nel XV secolo. Sembra quasi che la riscoperta degli antichi testi greci e latini abbia distratto l'attenzione degli studiosi dell'epoca dell'umanesimo dall'indagine dei fatti naturali per concentrarla sullo studio ammirato di ciò che il genio degli antichi aveva creato nell'arte e nella scienza tra quindici e venti secoli prima. Si verifica anche una certa decadenza dei centri universitari; la ricerca si sviluppa soprattutto nelle Corti dei principi e acquista un carattere piú erudito che originale, piú brillante che profondo. Il pensatore piú originale del Quattrocento è probabilmente il cardinale Nicola Krebs, detto Cusano, che va ricordato specialmente per l'influenza esercitata nel secolo successivo su pensatori come Giordano Bruno; ma il periodo creativo della filosofia medievale era terminato lasciando un vuoto intellettuale, nel quale esplode la rivoluzione scientifica dei secoli XVI e XVII, che romperà definitivamente con la tradizione classica e medievale.

Questa rivoluzione viene di solito associata al nome di Copernico e all'affermazione di un nuovo sistema del mondo, in cui il posto centrale spetta non piú alla Terra, ma al Sole; non meno importante è, però, la rinascita dell'atomismo che si inizia appunto nel secolo XVI. A prima vista si tratta di due problemi del tutto diversi, perché apparentemente non vi è affinità tra copernicanesimo e atomismo; ma, tolta la Terra dal centro del mondo, era naturale compiere il passo successivo: come la Terra è un pianeta fra tanti, il Sole è una fra le tante stelle che popolano l'universo infinito, come rivelerà in breve il cannocchiale galileiano e, ovviamente, non ha senso parlare di «centro» di uno spazio infinitamente esteso. Fu merito precipuo di Giordano Bruno l'intuizione che, nello stesso modo, l'atomismo eliminava ogni distinzione tra la materia terrestre e quella di qualunque altro corpo dell'universo, perché lo stesso processo fortuito di aggregazione di atomi che aveva dato origine alla Terra e ai corpi terrestri avrebbe potuto ripetersi in ogni altro luogo. Cosí «l'atomismo si fuse stabilmente con il copernicanesimo per costituire il nucleo fondamentale di quella "nuova filosofia" che determinò l'indirizzo dell'immaginazione scientifica» [Kuhn 1957, trad. it. p. 303].

Si è visto come Aristotele considerava quattro qualità elementari dei corpi (caldo, freddo, umido, secco); la necessità di analizzare la nozione di materia con una nuova metodologia è affermata ora da Galileo con la sua distinzione tra qualità «primarie» e «secondarie». «Ma prima mi fa di bisogno fare alcuna considerazione sopra questo che noi chiamiamo *caldo*, del qual dubito grandemente che in universale ne venga formato concetto assai lontano dal vero, mentre vien creduto essere un vero accidente affezzione e qualità che realmente risegga nella materia dalla quale noi sentiamo riscaldarci... Vo io pensando che questi sapori, odori, colori, etc... non sieno altro che puri nomi, ma tengano solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sí che rimosso l'animale, sieno levate ed annichilate tutte queste qualità» [1623, ed. 1977 pp. 223, 224].

Quali saranno allora le qualità primarie o elementari, quelle, cioè, che «definiscono» la materia attraverso i suoi attributi necessari? Democrito aveva affermato «opinione il dolce, opinione l'amaro... opinione il colore; verità gli atomi e il vuoto» [Diels e Kranz 1951, 68, B.9], ma Galileo sembra esitare; contrariamente alla limpidità che gli è consueta, ciò che egli fa dire a Salviati nella prima giornata dei *Discorsi intorno a due nuove scienze* sulla «teoria degli indivisibili» è piuttosto oscuro e può sembrare addirittura contraddittorio, al punto che Descartes lo accuserà di «sofismi». Se ne ricava l'impressione che Galileo voglia dire e non dire e, pur aderendo all'atomismo democriteo, abbia timore di dichiararlo. (Non si dimentichi che i *Discorsi* sono stati scritti subito dopo il secondo disastroso processo). Ciò spiegherebbe la frase di Simplicio «Parmi che voi caminiate alla via di quei vacui disseminati di certo filosofo antico» e lo scatto di Salviati «Ma però voi non soggiugnete "il quale negava la Providenza divina", come in certo simil proposito, assai poco a proposito, soggiunse un tale antagonista del nostro Accademico» [1638, ed. 1958 p. 38; e cfr., alle pp. 626 sgg., le note di Adriano Carugo e Ludovico Geymonat].

Il sostenitore aperto e coraggioso dell'atomismo nel secolo XVII fu Pierre Gassendi, le cui idee probabilmente ebbero notevole influenza sul giovane Newton, ma «la fisica e la metafisica cartesiane furono grandemente sopravalutate dai contemporanei a danno di Gassendi» [Hall 1978, p. 254; l'affermazione riportata nel testo è di Tiesch]. La dottrina cartesiana in realtà si avvicina di piú alla metafisica aristotelica che all'epistemologia scientifica moderna o anche a quella di Galileo e di Newton. A causa della ripugnanza per l'idea di vuoto – ripugnanza che neppure i famosi esperimenti di Evangelista Torricelli e di Blaise Pascal riescono a fargli superare – e in omaggio alla sua «regola dell'evidenza», Descartes attribuisce alla materia le uniche proprietà (primarie) della «estensione», della «impenetrabilità» e del «movimento»; in base a queste proprietà si devono spiegare tutti i fenomeni naturali. Specie nel continente europeo la maggior parte dei fisici resteranno a lungo legati al meccanicismo cartesiano. Per esempio, il piú significativo dei trattati di fisica del secolo XVIII, le *Lettres à une Princesse d'Allemagne* di Eulero, uno dei maggiori matematici di tutti i tempi, è in aperta polemica a questo riguardo non solo con la monadologia leibniziana, ma anche con la teoria newtoniana della gravitazione.

Anche il grande fisico olandese Christiaan Huygens è profondamente influenzato dalle idee cartesiane; a lui si deve però la scoperta della conservazione dell'energia cinetica e della quantità di moto negli urti elastici tra particelle e, soprattutto, la teoria ondulatoria della luce, la cui importanza per la teoria della materia apparirà piú avanti.

La distinzione tra qualità primarie e secondarie, accettata anche dal filosofo empirista John Locke è invece confutata da George Berkeley; l'acuta critica berkeleyana conduce alla famosa teoria che la materia non ha esistenza fuori della mente che la percepisce, l'unica realtà direttamente conosciuta è la mente. La posizione «spiritualistica» di Berkeley è decisamente contestata da David Hume, il quale sostiene che una critica analoga si può fare anche all'idea interiore di «mente», che non è altro che un nome per l'insieme delle idee; la mente *è* le percezioni e le memorie. Il risultato di questa controversia fu riassunto nel celebre gioco di parole «No matter, never mind» (in inglese le frasi *No matter* e *Never mind* significano 'Non importa' e 'Non preoccupatevi', ma anche, rispettivamente, 'Niente materia' e 'Non piú mente').

Anziché a queste discussioni tra «spiritualisti» e «materialisti», un fisico è peraltro portato assai piú a interessarsi alle vedute di Isaac Newton, che cerca di spiegare le proprietà della materia assumendo uno schema o «modello» fisico-matematico, derivato dall'atomismo (anche se Newton non si dichiara apertamente un atomista). È evidente che per Newton la giustificazione dell'ipotesi o, meglio, del modello atomico non sta in argomentazioni logiche o metafisiche, ma nella sua capacità di rappresentare i fenomeni conosciuti e nella sua fecondità nel prevederne di nuovi; perciò le proprietà degli atomi non sono postulate in base a un'evidenza di tipo cartesiano, ma sono niente altro che quelle «virtú» o «capacità» che servono a spiegare le proprietà dei corpi sensibili. È quindi sciocco chiamare «occulte» – come fanno gli avversari cartesiani di Newton – queste proprietà, perché non sono «chiare ed evidenti»; quale può essere infatti il criterio di evidenza se non l'osservazione dei fenomeni? «Le parti piú piccole dei corpi non hanno certe potenze, virtú o forze per effetto delle quali agiscono a distanza, non solo sui raggi di luce... ma anche le une sulle altre, al fine di produrre una gran parte dei fenomeni della natura? È infatti ben noto che i corpi agiscono l'uno sull'altro per effetto delle attrazioni di gravità, del magnetismo e dell'elettricità; e questi esempi... rendono non improbabile che ci possano essere altri poteri attrattivi oltre questi... Io considero questi princípi non come qualità occulte... ma come leggi generali della natura, dalle quali le stesse cose sono formate. La realtà di questi princípi ci si manifesta attraverso i fenomeni, quantunque non se ne siano ancora scoperte le cause» [Newton 1704, trad. it. pp. 581, 601].

Le particelle ultime della materia non sono dunque solo «qualcosa» che occupa un certo spazio, dove niente altro può entrare, e può muoversi, cioè cambiare posizione; esse sono soprattutto centri di forze (gravitazionali, elettriche, magnetiche e di altri tipi eventualmente ancora ignoti). I loro moti sono determinati da queste forze, secondo i tre principî della meccanica, e da questi moti, nonché dagli equilibri tra le forze, sono determinate le proprietà macroscopiche della materia. Questo è precisamente il metodo scientifico moderno, che non verrà messo piú in discussione; ma se si riflette che ancora all'inizio del nostro secolo fisici e chimici come Ernst Mach e Wilhelm Ostwald negavano la «realtà» degli atomi per l'impossibilità di osservarli direttamente, non si può non restare ammirati di fronte alla straordinaria intuizione del genio newtoniano.

4. *Atomi e molecole nella chimica; la teoria cinetica dei gas.*

Il secolo XVIII è il secolo dell'illuminismo, cioè di un movimento culturale che – sviluppando i contenuti della rivoluzione scientifica – tenta di sostituirsi alla tradizione medievale e classica. L'insistenza degli illuministi sui temi politico-religiosi, a scapito dell'interesse per i problemi teoretici, finisce, però, con il creare una figura di filosofo-letterato (di cui la personalità piú rappresentativa è Voltaire), che pur riconoscendo, anzi esaltando, il valore della scienza, rimane distaccato da essa. «Cosí il gran discorrere di scienza, di verità scientifiche da contrapporsi ai dogmi religiosi, di sempre nuove vittorie della ragione, finisce per gettare un'ombra di dilettantismo su molte opere degli illuministi, anche su alcune che sarebbe ingiusto tacciare di superficialità. Quando si cercano le lontane radici di quella frattura fra le due culture (umanistica e scientifica) che costituirà una delle peggiori calamità della nostra epoca, non si può non prendere atto che tali radici risalgono proprio al Settecento. Il fatto singolare è che – in tale epoca – nessuno sarebbe stato disposto ad ammettere una qualsiasi forma di esplicita separazione fra la scienza e la cultura umanistica; eppure questa separazione si veniva di fatto affermando per il graduale disimpegno dei "filosofi-letterati" dai problemi di fondo della matematica, della fisica e della biologia» [Geymonat 1970-72, III, pp. 74-75].

Una cospicua eccezione è naturalmente Immanuel Kant, i cui profondi studi giovanili di matematica, fisica e astronomia influirono profondamente sul suo pensiero, tanto che è lecito considerarlo un filosofo-scienziato come prima di lui erano stati Aristotele e Descartes; invero – sembra con ragione – Geymonat [*ibid.*, p. 575] afferma che «il pensiero di Kant si riallaccia direttamente a quello di Galileo»; da ciò l'enorme importanza che Kant ha avuto in tutta la scienza teoretica successiva, talora senza che gli stessi scienziati se ne rendessero conto.

Comunque, a partire dal Settecento le ricerche scientifiche si svilupparono indipendentemente dalla teoria della conoscenza – anzi, se mai, è questa che in vari casi deve prendere atto dei risultati scientifici – anche se qualche scienziato sente talora la necessità di una premessa epistemologica a chiarimento della propria posizione; ciò avviene soprattutto quando si tratta di enunciare principî di grande generalità – come i principî della termodinamica – oppure della revisione di idee profondamente radicate, come quella di tempo assoluto o di causalità. In molti casi si tratta, forse, di un'epistemologia non molto profonda, ma lo scienziato non se ne preoccupa eccessivamente. Per esempio, la questione della realtà dell'oggetto che egli studia non si pone; il vero problema è di costruire un modello fisico-matematico dei fenomeni, che dia una descrizione fedele delle osservazioni e sia in grado di fare delle previsioni verificabili.

L'ostacolo principale dell'accettazione generale dell'atomismo durante il secolo XVIII e gran parte del XIX non deriva, perciò, da pregiudizi metafisici, ma dalla difficoltà pratica di «vedere» gli atomi e anche da un'ipotesi sbagliata sulla natura del calore, che veniva concepito come una «sostanza» materiale: il «fluido calorico», detto anche «flogisto». Ipotesi «sbagliata» significa niente altro

che un modello – quello di un fluido – che non permetteva di dare una descrizione soddisfacente di alcuni fenomeni, soprattutto di quelli che dimostravano l'equivalenza tra il calore e l'energia cinetica (o forza viva) e l'energia potenziale. L'esperienza di Joule (cfr. oltre) nel dimostrare questa equivalenza non solo conduce al principio della «conservazione dell'energia», ma rende necessaria anche l'ipotesi atomica.

Secondo la teoria del calorico, il flogisto è una sostanza contenuta in tutti i corpi combustibili e viene da questi perduta all'atto della combustione o «deflogisticazione». Questa teoria fu proposta nel XVII secolo da Becher e da Stahl – a quest'ultimo si deve il termine 'flogisto' – e fu accettata universalmente per piú di un secolo; essa si ritrova ancora nelle ricerche sul calore dei grandi fisici-matematici francesi dell'epoca napoleonica: Pierre-Simon de Laplace, Joseph Fourier – il quale, però, enunciò la sua «teoria analitica del calore» in forma indipendente da ogni ipotesi sulla sua natura –, Siméon-Denis Poisson e Sadi Carnot. Gli esperimenti di Cavendish e di Priestley avevano invero mostrato che il peso dei prodotti della combustione è maggiore di quello delle sostanze prima di essere bruciate; ma invece di concludere che la sostanza acquista qualcosa dall'ambiente, se ne deduceva che il flogisto aveva un peso negativo!

Il merito di aver refutato la teoria del flogisto è spesso attribuito ad Antoine-Laurent Lavoisier, il quale dai suoi studi sulla combustione pervenne alla conclusione che questa consiste nella combinazione del combustibile con l'aria «deflogisticata» di Priestley, cioè con l'ossigeno; la conclusione che l'aria o un componente dell'aria è indispensabile per la produzione della fiamma era stata già raggiunta nel XVII secolo da Robert Boyle e Robert Hooke. Tuttavia nella lista di sostanze semplici contenuta nel famoso *Traité élémentaire de Chimie* [1789], Lavoisier include anche la luce e il calorico, oltre a ventitré elementi – nel senso moderno del termine – e ad alcuni composti. Gli elementi conosciuti da Lavoisier sono metalli in gran parte noti fin dall'antichità (rame, piombo, oro, ferro, ...) e inoltre l'ossigeno, l'idrogeno, l'azoto, lo zolfo, il carbonio e il fosforo.

Come è stato accennato, la dimostrazione definitiva della falsità della teoria del calorico deriva dalla dimostrazione della convertibilità di energia meccanica in calore; dopo alcuni importanti contributi da parte di Benjamin Thompson conte di Rumford e di Humphry Davy, gli esperimenti decisivi si devono a James Prescott Joule, il quale nel 1847 riuscí a dimostrare che la «forza viva» posseduta da un corpo di 817 libbre, che si muove con la velocità di 8 piedi al secondo, è convertibile in una quantità di calore sufficiente a far salire di 1 grado Fahrenheit la temperatura di 1 libbra d'acqua. Quando vediamo un corpo arrestarsi a causa dell'attrito «noi possiamo concludere con sicurezza che questi moti che costituiscono la forza viva non sono "annichilati" dall'attrito. Noi li perdiamo solo di vista per qualche tempo... C'è perciò motivo di pensare che le particelle di tutti i corpi, gli atomi che li compongono, siano in uno stato di movimento quasi inconcepibilmente rapido... Un aumento della velocità delle particelle costituirà un aumento della temperatura», affermava Joule in una conferenza su *Matter, Living Force and Heat* tenuta a Manchester il 28 aprile 1847.

Già cinque anni prima un medico tedesco, Robert Mayer, aveva affermato

sostanzialmente lo stesso principio, senza però effettuare esperimenti, mentre, lo stesso anno, Hermann von Helmholtz pubblicava la sua grande memoria *Sulla conservazione della forza* (*Über die Erhaltung der Kraft*), in cui estendeva anche ai fenomeni elettrici e magnetici il principio della conservazione dell'energia. Il termine ἐνέργεια o 'lavoro accumulato', che s'incontra già in Aristotele, acquista cosí un significato piú preciso, pur essendo ancora l'energia concepita come una proprietà della materia. Toccherà ad Einstein dimostrare che ogni forma di energia possiede una massa (inerziale) ben determinata ed è anche sorgente di campo gravitazionale, di modo che apparirà inutile ogni distinzione tra materia ed energia.

L'idea moderna di «elemento» viene fatta da alcuni risalire a Boyle, da altri a Lavoisier; quest'ultimo, però, si esprime in termini molto prudenti: «L'aspirazione a ridurre tutti i corpi della natura a tre o quattro elementi procede da un pregiudizio che ci è stato tramandato dai filosofi greci... Tutto ciò che si può dire sul numero e la natura degli elementi è, nella mia opinione, limitato a discussioni interamente di natura metafisica... Se col termine 'elemento' noi vogliamo designare quegli atomi semplici e indivisibili da cui è composta la materia, è estremamente probabile che non ne sappiamo nulla; ma se impieghiamo il termine 'elementi' o 'principî dei corpi' per esprimere l'idea dell'ultimo punto che l'analisi può raggiungere, dobbiamo accettare come elementi tutte le sostanze in cui siamo capaci con qualunque mezzo di decomporre i corpi» [1789, ed. 1801 pp. XV, XVI, XVII].

In realtà la nozione di «elemento» s'identifica per noi con quella di atomo (nel senso moderno e non in quello democriteo di particella indivisibile) e quindi è giusto attribuire il merito di averla definita in termini moderni al chimico inglese John Dalton nel suo giustamente famoso *New System of Chemical Philosophy*. Le idee di Dalton sull'atomismo non sembra siano state derivate direttamente dall'esperienza, ma sembra invece gli siano state suggerite dallo studio delle opere di Newton; la loro importanza sta nell'aver dato una spiegazione semplice e convincente delle leggi chimiche scoperte intorno al principio del secolo XIX: la legge degli equivalenti (Richter), la legge delle proporzioni fisse o definite (Proust), la legge delle proporzioni multiple (Dalton) e la legge dei rapporti volumetrici (Gay-Lussac).

Un elemento è caratterizzato dal fatto che le ultime particelle in cui esso è divisibile con mezzi chimici, cioè i suoi atomi, sono tutte identiche tra loro e diverse da un elemento all'altro, di modo che si può parlare di un atomo di idrogeno, di un atomo di ossigeno, ecc.; ciò che distingue un atomo di un elemento da quello di un altro è in primo luogo la massa o, piú semplicemente, il «peso atomico», cioè il rapporto tra la massa dell'atomo e quella di un atomo campione. Si vedrà però tra poco che piú importanti delle masse come fattore differenziante sono le proprietà elettriche. Nel formare le sostanze composte gli atomi degli elementi si riuniscono in «molecole» – che sono le particelle ultime dei composti – e poiché ogni molecola è formata da un numero intero fisso di atomi dei singoli elementi, questi si possono riunire unicamente secondo proporzioni fisse; queste sono determinate dalla «valenza», la quale stabilisce il numero di atomi di un

elemento che possono entrare in una molecola di un suo composto con un altro elemento. Le leggi di Richter, Proust e Dalton si spiegano immediatamente assumendo che ogni atomo possieda una valenza determinata – o in qualche caso due o tre valenze tipiche – la quale determina i composti possibili. La legge di Gay-Lussac consentí ad Amedeo Avogadro di formulare la famosa «ipotesi di Avogadro», secondo cui volumi uguali di gas (non importa se si tratta di elementi o di composti) alla stessa temperatura e pressione contengono numeri uguali di molecole; in suo onore il numero di molecole contenute in una mole (cioè una quantità di una sostanza pari, in grammi, al suo peso molecolare) è chiamato «numero di Avogadro». La determinazione sperimentale del numero di Avogadro – $6{,}0249 \times 10^{23}$ per mole (nella scala fisica: cfr. oltre) –, nel dare una consistenza numerica alla nozione di atomo e fissare l'ordine delle grandezze atomiche, segna l'accettazione definitiva della struttura atomica della materia, nel senso che la concretezza della misura è la garanzia della realtà degli atomi; la massa di un atomo di idrogeno risulta uguale a $1{,}67333 \times 10^{-24}$ grammi. Tuttavia la sistemazione logica della chimica fu raggiunta per merito principale di Stanislao Cannizzaro non prima di una cinquantina di anni dopo la pubblicazione della teoria di Dalton e dell'ipotesi di Avogadro; il concetto di valenza fu introdotto da Edward Frankland verso la metà del secolo e precisato da August Kekulé qualche anno dopo, mentre la prima valutazione approssimata del numero di Avogadro si deve a Joseph Loschmidt nel 1866.

Il primo tentativo di basare una teoria fisico-matematica sulla struttura atomica della materia si può far risalire a Daniele Bernoulli, il quale nel 1738 dimostrò che la legge di Boyle della proporzionalità inversa tra la pressione e il volume di un gas mantenuto a temperatura costante si poteva derivare dall'ipotesi che la pressione fosse dovuta agli urti delle particelle (molecole) del gas contro le pareti del recipiente, assumendo che esse si muovano liberamente, cioè senza interagire tra loro. Ne seguiva inoltre che la temperatura del gas era in qualche modo legata all'energia cinetica delle sue particelle. In tal modo, però, la «teoria cinetica dei gas» contrastava con le idee sul calorico e fu perciò abbandonata per piú di un secolo, finché fu riportata alla luce da Joule e da Krönig; nella sua forma attuale essa si deve a Rudolf Clausius, James Clerk Maxwell, Josiah Willard Gibbs e specialmente a Ludwig Boltzmann, uno dei fondatori della moderna meccanica statistica. Una prova diretta dei moti molecolari si ebbe nel «moto browniano» (da Robert Brown, botanico della prima metà del secolo scorso), cioè nel moto casuale di particelle microscopiche sospese in un liquido, che fu spiegato verso la fine del secolo come dovuto agli urti con le particelle del liquido.

Uno dei risultati piú importanti della teoria cinetica dei gas fu quello di rendere familiari varie nozioni, come quelle di moti molecolari, urti o collisioni tra particelle, cammino libero medio, viscosità, ecc.; ma soprattutto si comprese che le grandezze «macroscopiche» del gas – densità, pressione, temperatura – erano associate con i valori medi di grandezze «microscopiche» come il numero di particelle per unità di volume, la quantità di moto delle molecole, la loro energia cinetica, ecc. Entra cosí nella fisica un concetto del tutto nuovo, derivato dalle indagini di Pascal e Pierre de Fermat sui giochi d'azzardo e approfondito poi da

Giacomo Bernoulli, Laplace, Poisson e molti altri, tanto da costituire un ramo particolare delle matematiche: il concetto di «probabilità», che nel secolo XX condurrà a una revisione nel modo di vedere i fenomeni atomici non meno radicale di quella compiuta dalla rivoluzione copernicana. In un certo senso esso consentirà un superamento del dualismo «discreto/continuo», ma metterà in crisi una delle idee fondamentali del meccanicismo: l'idea di causalità.

5. *L'elettrone e il nucleo atomico; le righe spettrali e il corpo nero.*

Le proprietà elettriche di certe sostanze, come l'ambra (ἤλεκτρον), erano note fin dalla piú remota antichità, come pure le proprietà magnetiche di altre, come la magnetite (estratta nella città tessala di Magnesia), ma gli studi sistematici sull'elettricità e sul magnetismo risalgono solo al secolo XVIII – se si eccettua il famoso trattato di William Gilbert *De Magnete magneticisque Corporibus et de magno Magnete Tellure Physiologia nova*, tenuto in gran conto da Galileo. La scoperta di due tipi di elettricità «vitrea» (o positiva) e «resinosa» (o negativa) si deve a Charles Du Fay de Cisternay e la prima formulazione fisico-matematica dell'azione elettrostatica tra due cariche a Charles Coulomb. Alla fine del secolo XVIII a seguito della famosa controversia con Luigi Galvani, Alessandro Volta perveniva all'invenzione della «pila», che doveva aprire tutto un nuovo campo d'indagini sulla corrente elettrica e i suoi effetti con conseguenze di portata incalcolabile non solo per la scienza, ma anche per l'industria e l'intero vivere civile.

Non è questo il luogo per fare la storia dello sviluppo dell'elettromagnetismo; basti ricordare i nomi di Hans Christian Örsted – cui si deve la scoperta degli effetti magnetici della corrente elettrica –, di André-Marie Ampère e di Michael Faraday, che aprirono la via alla teoria matematica del «campo elettromagnetico» sviluppata da Maxwell tra il 1855 e il 1870. La presenza di cariche elettriche nella materia è resa evidente da un grande numero di fenomeni e fin dal 1819 il chimico svedese Berzelius aveva suggerito che le combinazioni chimiche fossero dovute all'unione elettrica di un componente elettropositivo (base) con un componente elettronegativo (acido). Già qualche anno prima era stato scoperto l'effetto chimico della corrente elettrica (elettrolisi) e Carlisle e Nicholson avevano effettuato l'elettrolisi dell'acqua. Nel 1833 Faraday trovò che il peso in grammi di ciascuno dei prodotti primari liberati nell'elettrolisi è proporzionale al prodotto della quantità di elettricità che ha attraversato l'elettrolita per il loro equivalente chimico.

La legge di Faraday sull'elettrolisi rivela un fatto fondamentale: ad ogni molecola in un elettrolita, o meglio ad ogni «ione» (il nome sembra sia stato suggerito a Faraday da William Whewell e significa in greco 'mobile' o 'vagante'), deve essere associata una quantità di elettricità fissa, multipla intera di una «unità naturale» di carica elettrica. Questa è la prima evidenza sperimentale dell'esistenza di una «particella elementare» di elettricità, che entra in qualche modo nella struttura di tutti i corpi; Faraday stesso, però, non pervenne a questa conclusio-

ne, che sembra sia stata raggiunta da Helmholtz circa quarant'anni dopo. La quantità di elettricità necessaria a depositare una mole di elettrolita (detta qualche volta un «faraday») è di 96 522 coulomb; perciò una carica elettrica elementare è uguale a 96 522 divisa per il numero di Avogadro, cioè $1{,}602 \times 10^{-19}$ coulomb o $4{,}8029 \times 10^{-10}$ u.e.s. (unità elettrostatiche).

La prova piú diretta dell'esistenza di particelle elettriche (negative) nella materia viene peraltro dagli esperimenti sulle scariche elettriche nei gas rarefatti che furono condotti nella seconda metà del secolo scorso da molti fisici in varie parti d'Europa. Per molto tempo vi fu un'accesa discussione sulla causa dei fenomeni luminosi che accompagnano la scarica, ma alla fine, per opera specialmente di Crookes, Thomson e altri fisici inglesi, si poté dimostrare che la scarica è costituita da un flusso di particelle cariche negativamente (raggi «catodici»); la prova definitiva si deve a Jean Perrin. Si poté anche provare che le particelle erano assolutamente identiche, qualunque fosse la sostanza da cui era formato il «catodo» del tubo in cui veniva prodotta la scarica. Il termine 'elettrone' per queste particelle fu introdotto da George J. Stoney verso la fine del secolo scorso.

Ovviamente la presenza di cariche negative nella materia richiede una controparte di cariche positive. L'esistenza di queste è evidente nel caso degli elettroliti, in cui vi sono ioni positivi e negativi, i quali si raccolgono agli elettrodi di polarità opposta, perdendovi la loro carica. D'altra parte il fatto che i gas in condizioni normali sono praticamente isolanti perfetti dimostra che ordinariamente gli atomi sono elettricamente neutri e quindi le cariche elettriche di ambedue i segni si trovano nell'interno degli stessi atomi. Nasce cosí l'idea che gli atomi (nel senso moderno della parola) non siano particelle semplici e indivisibili, ma siano composti da un certo numero di elettroni e da una carica elettrica positiva; la posizione di quest'ultima nell'atomo non era dapprima ben chiara, ma nelle famose esperienze di Ernest Rutherford si dimostrerà che sono localizzate in una piccolissima regione centrale che comprende anche praticamente la totalità della massa dell'atomo: il nucleo.

Il rapporto tra la carica e la massa di un elettrone si determina agevolmente studiandone il moto in un campo elettrico e magnetico, come fu mostrato da Thomson; il risultato è $5{,}273 \times 10^{17}$ u.e.s./grammi; la massa è, perciò, $9{,}108 \times \times 10^{-28}$ grammi, 1837 volte minore di quella dell'atomo piú leggero, quello dell'idrogeno. Questo valore fu confermato dagli esperimenti di Millikan con il metodo delle gocce d'olio nello stesso anno degli esperimenti di Rutherford sulle dimensioni del nucleo (1911). In tal modo al principio della seconda decade di questo secolo si andava profilando l'immagine attuale degli atomi: un nucleo massiccio carico di elettricità positiva, circondato da un certo numero di elettroni sufficiente a neutralizzarne la carica. Era però anche evidente che una struttura di questo genere implica che gli elettroni ruotino intorno al nucleo per non cadervi sopra, proprio come i pianeti ruotano intorno al Sole; ma ciò conduce a gravi difficoltà con la teoria dell'elettromagnetismo, come apparirà piú avanti.

A questo punto sembra indispensabile soffermarsi un istante a riflettere sopra la differenza tra questi risultati e l'antica teoria atomica. Per Democrito, come forse per Newton e anche per Dalton, un atomo d'oro è un pezzettino d'oro, piccolo al di là di ogni immaginazione, ma in fondo ancora «oro»; l'immagine dell'atomo ricavata dalle esperienze moderne è invece qualcosa del tutto diversa e rivela l'esistenza di un mondo «atomico» del tutto nuovo. Cosí da un lato si ha la realtà di tutti i giorni, dove l'acqua è acqua, il legno è legno, l'oro è oro; una realtà fatta di oggetti solidi, liquidi, di gas, di forme, di colori, di suoni. Dall'altro lato c'è un mondo microscopico, fatto di masse, di cariche elettriche, di centri di forza; un mondo senza colori, senza suoni, senza forme. E sorge la domanda: quale è il mondo «reale»: quello di tutti i giorni o quello della scienza? e come descrivere il mondo degli atomi? chi ha mai «visto» un elettrone o un nucleo atomico? È lo stesso concetto di «realtà» che si pone in discussione ed è certo che, anche se si volesse, non si potrebbe ignorare l'immagine della realtà che ci dà la scienza con tutte le sue applicazioni, che hanno prodotto e continuano a produrre da un anno all'altro un cambiamento del modo di vivere – per il bene e per il male – piú grande di quello verificatosi in tutti i millenni che ci hanno preceduto. Il ritorno seicentesco allo studio della natura ha un risultato ben piú profondo e radicale di quello che i protagonisti della rivoluzione scientifica o gli illuministi del XVIII secolo avrebbero potuto immaginare. E, come si vedrà, si è solo agl'inizi.

Nel secolo scorso molti importanti risultati si erano andati accumulando anche per quanto riguarda le proprietà della luce in relazione con la sorgente luminosa. Le esperienze di Newton sulla decomposizione della luce ordinaria nei suoi colori elementari, quelle di Huygens sulla rifrazione e la polarizzazione e la scoperta da parte di Øle Römer che la luce si propaga con velocità grandissima, ma finita – come suggerito da Galileo – erano state seguite nel secolo XVIII da un periodo di scarsa attività nello studio dei fenomeni luminosi; due teorie – quella corpuscolare di Newton e quella ondulatoria di Huygens – si disputavano il campo, senza che fosse possibile decidere quale delle due era quella corretta. Al principio del secolo XIX gli esperimenti di Thomas Young e di Augustin Fresnel riuscirono a risolvere la questione in favore della teoria ondulatoria, aprendo però nuovi problemi. Secondo la teoria di Young e di Fresnel le onde luminose sono trasversali, anziché longitudinali, e nessun mezzo elastico potrebbe propagare onde trasversali di frequenza cosí elevata e nello stesso tempo non opporre alcuna resistenza al moto dei corpi celesti. Era sempre la vecchia obiezione di Newton all'esistenza dell'etere cartesiano, benché la prova definitiva in favore della teoria ondulatoria fosse stata raggiunta, con la misura della velocità della luce in mezzi con diversi indici di rifrazione da parte di Fizeau e di Foucault.

Verso la metà del secolo scorso era ben noto che, per quanto riguarda la composizione della luce, cioè lo «spettro», le diverse sorgenti si dividono in tre classi: i solidi e i liquidi incandescenti emettono luce in cui sono contenuti tutti i colori, cioè onde di tutte le lunghezze (spettri «continui»); le fiamme per lo piú emettono luce contenente solo un certo numero di lunghezze d'onda, che in uno spettroscopio si osservano come righe luminose («righe di emissione»); infine un gas interposto tra una sorgente di spettro continuo e lo spettroscopio dà luogo a un certo numero di righe oscure (righe di «assorbimento»). Si era pure trovato che

la lunghezza d'onda delle righe di assorbimento è identica a quella delle righe di emissione in una fiamma contenente lo stesso elemento; la legge generale che governa la relazione tra assorbimento ed emissione era stata scoperta nel 1859 da Gustav Robert Kirchhoff, il quale riconobbe anche che le lunghezze d'onda delle righe di emissione (o di assorbimento) sono legate alla natura chimica degli elementi presenti nella fiamma o nel gas e possono, perciò, servire a riconoscerne la presenza. Nasceva cosí l'analisi spettroscopica, che tanta parte doveva avere nello sviluppo della fisica atomica e dell'astrofisica.

Gli studi successivi sugli spettri degli elementi non tardarono a rivelare certe regolarità (multipletti e serie spettrali) delle righe di un certo elemento, che talora si possono rappresentare con formule matematiche semplici, come nel caso delle serie spettrali dell'idrogeno (serie di Lyman, di Balmer, di Paschen). Fa parte di queste regolarità anche il fatto che esistono spesso gruppi di tre righe spettrali tali che il reciproco della lunghezza d'onda di una di esse è uguale alla somma dei reciproci delle altre due (principio di «combinazione» o principio di Ritz). Finalmente si trovò che le righe di un elemento nell'arco voltaico differiscono da quelle nella scintilla elettrica (spettri di elementi neutri e ionizzati).

Dopo la scoperta da parte di Maxwell che il fenomeno ondulatorio che si manifesta sotto la forma di luce è la propagazione di variazioni dello stato elettrico e magnetico dello spazio tra i corpi, cioè del campo elettromagnetico – e non quello di onde in un mezzo elastico – le difficoltà corrispondenti all'ipotetico «etere» in gran parte vennero eliminate; inoltre divenne evidente che la spiegazione dei fenomeni luminosi doveva essere ricercata nel moto delle cariche elettriche esistenti in seno alla materia. La gamma delle onde elettromagnetiche era stata estesa con le scoperte delle radiazioni infrarosse e di quelle ultraviolette, rivelate al principio del secolo scorso dall'astronomo William Herschel e, rispettivamente, da Johann Wilhelm Ritter, le quali sono identiche alla luce ordinaria, da cui differiscono solo per la lunghezza d'onda, maggiore per le onde infrarosse, minore per quelle ultraviolette. Piú difficile fu riconoscere che i «raggi X», scoperti nel 1895 da Wilhelm Conrad Röntgen, appartengono alla stessa classe di fenomeni; la loro lunghezza d'onda, da cento a mille volte minore di quella della luce ordinaria, rende infatti assai difficile osservare i fenomeni d'interferenza e diffrazione di raggi X, ma quando si trovò il modo d'impiegare a tale scopo i reticoli cristallini (Max von Laue, i Bragg) sorse una spettroscopia dei raggi X, la cui relazione con i processi atomici è piú immediata che nel caso della spettroscopia ordinaria. Le leggi della spettroscopia dei raggi X furono scoperte da Moseley, morto giovanissimo nella spedizione ai Dardanelli durante la prima guerra mondiale.

L'importanza di questi studi per la struttura degli atomi apparirà nel prossimo paragrafo. Forse ancora piú pieno di conseguenze fu però lo studio dello spettro (continuo) del cosiddetto «corpo nero». Si chiama per definizione «nero» un corpo la cui superficie assorbe completamente tutta la luce che incide su di essa, ma in realtà un corpo nero non è tale nel senso letterale della frase: portato a temperatura elevata diviene luminoso e colorato. Le leggi di Kirchhoff mostrano allora che l'intensità e la composizione spettrale della luce emessa dipendono

solo dalla temperatura, ma non dalla natura chimica del corpo. Il problema di trovare la funzione della lunghezza d'onda e della temperatura che rappresenta l'emissività del corpo nero fu affrontato senza esito da alcuni fra i maggiori fisici del secolo scorso, finché nel 1900 fu risolto da Max Planck. A tale scopo, però, Planck fu costretto a introdurre un'idea che si rivelò tra le piú rivoluzionarie della storia della fisica.

L'emissione e l'assorbimento di luce corrispondono a scambi di energia tra la materia e il campo elettromagnetico; l'ipotesi di Planck fu che quando ciò avviene la quantità di energia scambiata è sempre un multiplo intero di una quantità (*quantum*) uguale al prodotto della frequenza della luce per una costante universale (costante di Planck) che si suole indicare con h. Secondo le valutazioni attuali, $h = 6{,}6252 \times 10^{-27}$ g cm^2 sec^{-1}. Quest'idea equivale in sostanza ad assumere che anche l'energia – o, per lo meno, l'energia che corrisponde alla luce – abbia una struttura atomica o «corpuscolare»; essa sembra perciò voler far rivivere la vecchia teoria corpuscolare di Newton, ma è in realtà qualcosa di completamente diverso.

In verità ormai nessuno poteva pensare a mettere in dubbio la teoria ondulatoria, tanto piú che dopo Maxwell l'identificazione della luce con onde elettromagnetiche non poteva essere posta in discussione. D'altra parte l'ipotesi dei quanti di luce veniva ad affermare un fatto veramente incredibile: finché la luce si propaga l'energia elettromagnetica si trova distribuita sopra tutta la superficie dell'onda, come vuole la teoria ondulatoria, ma all'atto dell'assorbimento, per una specie di incomprensibile miracolo, essa si ritrova tutta concentrata nel punto dove c'è la particella che effettua l'assorbimento! Mentre sarà necessario ritornare su questa straordinaria proprietà della luce, si deve ricordare che uno dei primi ad accettare la teoria di Planck fu il giovane fisico Albert Einstein, in un famoso lavoro del 1905 che contiene la teoria dell'effetto fotoelettrico, cioè dell'emissione di elettroni da parte dei metalli sotto l'influenza della luce. Giustamente la spiegazione einsteiniana dell'effetto fotoelettrico fu considerata un'evidenza sperimentale diretta dell'esistenza dei quanti di luce o «fotoni». Un'altra evidenza simile, un poco meno diretta, si ricava dalla teoria del calore specifico dei solidi (cristalli).

6. *Il sistema periodico di Mendeleev e l'atomo di Bohr.*

Verso il 1860 il numero degli elementi conosciuti era salito a una sessantina – circa due terzi di quelli conosciuti attualmente; si sapeva inoltre che con questi era possibile formare gruppi di elementi aventi un comportamento chimico simile e i cui spettri ottici presentavano notevoli somiglianze. Ci sono, per esempio, i metalli alcalini, Li, Na, K, Rb e Cs, tipicamente monovalenti, i metalli alcalino-terrosi, Be, Mg, Ca, Sr e Ba, bivalenti, gli alogeni, ecc. Se poi si ordinano gli elementi secondo il loro peso atomico, si trovano delle interessanti regolarità; per esempio ogni metallo alcalino è seguito immediatamente da un metallo alcalino-terroso: il Li è seguito dal Be, il Na dal Mg, il K dal Ca, ...

Tutto ciò suggerí al chimico russo Dmitrij Ivanovič Mendeleev di ricercare una sistematicità in queste regolarità. La scoperta del «sistema periodico» degli elementi è certamente una delle piú notevoli della storia della scienza; molti anni prima che se ne ritrovasse la spiegazione, la sua fecondità si era già rivelata con il ritrovamento di numerosi elementi, le cui proprietà fisico-chimiche sono precisamente quelle che la loro posizione nel sistema aveva consentito di prevedere. Per esempio fin dal 1869 Mendeleev aveva predetto l'esistenza degli elementi «ekaaluminio», «ekaboro» ed «ekasilicio», che furono identificati rispettivamente con il gallio (Ga) scoperto nel 1875, con lo scandio (Sc) scoperto nel 1879, e con il germanio (Ge) scoperto nel 1886. Importantissima fu la scoperta dei «gas nobili» o «rari» dell'atmosfera (He, Ne, A, Kr, Xe), ciascuno dei quali viene in ordine di peso atomico prima di un metallo alcalino.

Con queste scoperte divenne possibile assegnare ad ogni elemento un numero intero progressivo (nell'ordine di peso atomico crescente) da 1 per l'H, fino a 92 per l'U – l'elemento naturale piú pesante –, lasciando dei posti vuoti per alcuni elementi che non erano stati ancora scoperti. (Questi elementi e un certo numero di «transuranici» non esistono in natura, ma sono stati «creati» artificialmente dopo il 1934). Il numero cosí assegnato fu chiamato «numero atomico», Z; per gli elementi piú leggeri Z è circa la metà del numero corrispondente al peso atomico, A; per gli elementi piú pesanti esso è considerevolmente minore della metà di A.

Tabella 1.

Il sistema periodico degli elementi. Il numero che precede il simbolo chimico indica il numero atomico (Z); il numero nella seconda riga è il peso atomico dell'isotopo piú abbondante arrotondato all'intero piú vicino (numero di massa, A). Quando A è tra parentesi, per quell'elemento non vi sono isotopi stabili.

1 H 1								
3 Li 7	4 Be 9							
11 Na 23	12 Mg 24							
19 K 39	20 Ca 40	21 Sc 45	22 Ti 48	23 V 51	24 Cr 52	25 Mn 55	26 Fe 56	27 Co 59
37 Rb 85	38 Sr 88	39 Y 89	40 Zr 90	41 Nb 93	42 Mo 98	43 Tc (99)	44 Ru 102	45 Rh 103
55 Cs 133	56 Ba 138	57 La 139	72 Hf 180	73 Ta 181	74 W 184	75 Re 187	76 Os 192	77 Ir 193
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Ku (260)					

Lantanidi (Terre rare)	58 Ce 140	59 Pr 141	60 Nd 142	61 Pm (147)	62 Sm 154	63 Eu 153	64 Gd 158
Actinidi	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)

La tabella 1 contiene il sistema periodico degli elementi secondo i dati attuali. Oltre che dalle proprietà fisico-chimiche degli elementi, l'ordinamento della tabella 1 è confermato da numerosi altri dati, come la legge di Moseley (fig. 1) relativa agli spettri X e i caratteri degli spettri ottici. La prova piú significativa viene, però, dalle già ricordate esperienze di Rutherford sulla diffusione delle particelle α. Le particelle α sono nuclei di He che vengono emessi con enorme energia da alcune sostanze radioattive (cfr. § 8); nel passare in prossimità di un nucleo atomico esse vengono deviate e l'angolo di deviazione dipende dalla distanza minima dal nucleo, a cui sarebbero passate se non fossero state deviate, e dalla carica elettrica del nucleo stesso. Con queste esperienze Rutherford riuscí a determinare le dimensioni nucleari – che, come è stato già detto, risultarono enormemente minori delle dimensioni atomiche – e anche il valore della carica elettrica positiva del nucleo; si trovò che quest'ultima è uguale a Z volte la carica elementare di elettricità.

Si ricava in tal modo una doppia interpretazione del numero atomico Z: 1) Z

							2 He 4
			5 B 11	6 C 12	7 N 14	8 O 16	9 F 19	10 Ne 20
			13 Al 27	14 Si 28	15 P 31	16 S 32	17 Cl 35	18 A 40
28 Ni 60	29 Cu 63	30 Zn 64	31 Ga 69	32 Ge 74	33 As 75	34 Se 80	35 Br 79	36 Kr 84
46 Pd 106	47 Ag 107	48 Cd 114	49 In 115	50 Sn 120	51 Sb 121	52 Te 130	53 I 127	54 Xe 132
78 Pt 195	79 Au 197	80 Hg 202	81 Tl 205	82 Pb 208	83 Bi 209	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rd (222)

65 Tb 159	66 Dy 164	67 Ho 165	68 Er 166	69 Tm 169	70 Yb 174	71 Lu 175
97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (256?)	103 Lw (260)

è uguale al numero di cariche elementari di elettricità positiva concentrate nel nucleo; 2) Z è uguale al numero di elettroni corrispondenti all'atomo elettricamente neutro. Una terza interpretazione di Z si vedrà piú avanti.

A questo punto, come fu già accennato, l'atomo appariva non piú come una particella semplice e indivisibile, ma un sistema complesso che presenta un'analogia col sistema solare: al centro un nucleo che riunisce in sé praticamente la totalità della massa e possiede una carica positiva pari a Z cariche elementari; intorno ad esso Z elettroni, la cui massa totale è trascurabile. Evidentemente l'identità chimica dell'elemento è data dal nucleo; gli elettroni sono tutti assolutamente identici, qualunque sia l'atomo da cui provengono. L'unità di carica elettrica – indicata di solito con la lettera e – è, come già detto, $4{,}8029 \times 10^{-10}$ u.e.s., mentre la massa corrispondente all'unità fisica di peso atomico è $M_{ph} = 1{,}6598 \times 10^{-24}$ grammi; un nucleo di numero atomico Z e peso atomico A ha una carica Ze e una massa AM_{ph}.

Benché a prima vista il modello atomico di Rutherford possa sembrare soddisfacente, un'analisi approfondita rivela delle difficoltà che sono insormontabili nell'ambito della fisica conosciuta al tempo in cui il modello fu proposto. Invero, secondo la teoria di Maxwell, una carica in moto non rettilineo e uniforme deve perdere continuamente energia sotto forma di onde elettromagnetiche;

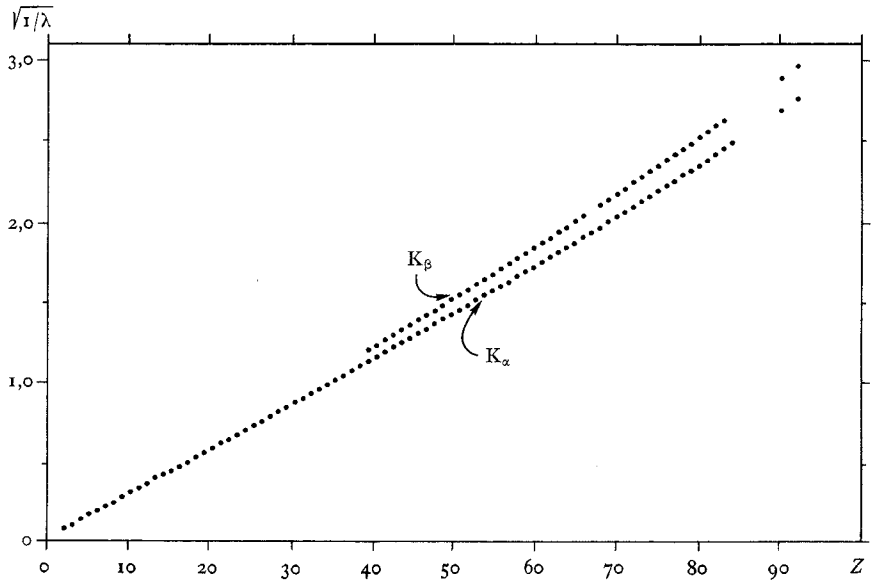


Figura 1.

La legge di Moseley. In ascissa il numero atomico, Z, in ordinata la radice quadrata del reciproco della lunghezza d'onda delle prime righe spettrali (K_α e K_β) dell'elemento, in ångström. La relazione non sarebbe cosí regolare, se invece di Z si fosse impiegato il peso atomico A.

quindi ciascuno degli Z elettroni non può girare stabilmente intorno al nucleo, come un pianeta intorno al sole, ma a causa della perdita continua di energia deve descrivere intorno al nucleo una spirale che si chiude sempre piú rapidamente e finire cosí per cadere sul nucleo. Rutherford e i fisici dell'epoca erano naturalmente ben consci di questa difficoltà, ma pure gli esperimenti con le particelle α erano decisamente in favore del modello. Una soluzione provvisoria della difficoltà fu indicata nel 1912 da Niels Bohr riattaccandosi all'ipotesi di Planck sul comportamento della luce negli scambi energetici con la materia. La teoria di Bohr consiste in due postulati, che hanno tutta l'aria di due ipotesi ad hoc – come infatti lo erano – ma la teoria ricevette ben presto una tale quantità di conferme sperimentali, da non lasciare alcun dubbio sul fatto che essa rispecchia una profonda realtà fisica riguardante la struttura atomica della materia.

I postulati di Bohr sono:

1) Quando un elettrone si muove intorno al nucleo lungo un'orbita appartenente a un insieme particolare (orbite «quantiche», da definire opportunamente) si verifica un'eccezione alle leggi dell'elettromagnetismo: non c'è emissione di onde elettromagnetiche.
2) L'emissione e l'assorbimento di onde avvengono in modo istantaneo, quando un elettrone «salta» da un'orbita quantica a un'altra; la frequenza ν delle onde è uguale a E/h, dove E è la differenza di energia fra le due orbite e h la costante di Planck; quindi l'energia è assorbita o emessa per «quanti» di energia $E = h\nu$.

Bohr aggiunge alcune regole, perfezionate successivamente da vari fisici, tra cui specialmente Arnold Sommerfeld; queste regole permettono di classificare o enumerare le orbite in base a certi numeri interi o «quantici»: il numero quantico «totale» n è il piú importante nel determinare l'energia E dell'orbita; il numero quantico «azimutale» l fissa il momento della quantità di moto o momento angolare dell'orbita; infine un terzo numero m determina i possibili orientamenti del piano dell'orbita in un eventuale campo magnetico, ma non interessa per il calcolo dell'energia. Il momento angolare è uguale a $l\hbar$, dove $\hbar = 1{,}05443 \times 10^{-27}$ g cm^2 sec^{-1} è uguale alla costante di Planck divisa per 2π. Queste regole pongono anche limitazioni ai valori possibili di questi numeri: n può prendere qualunque valore intero da 1 a infinito; vi sono n orbite con lo stesso n, nelle quali l prende i valori 0, 1, ..., $n-1$; ognuna di queste può assumere $2l+1$ orientamenti che corrispondono rispettivamente a $m = -l$, ..., 0, ..., $+l$. Perciò il numero totale di orbite che differiscono almeno per l'orientamento, per n dato, è $1+3+5+\ldots+[2(n-1)+1] = n^2$.

Una delle addizioni piú importanti che si trovò necessario apportare alla teoria originale di Bohr fu quella di attribuire a un elettrone, accanto alla massa e alla carica elettrica, anche un momento angolare «intrinseco» o «spin» (cui si accompagna anche un momento magnetico), come se l'elettrone fosse una distribuzione di massa e carica elettrica in rapido moto di rotazione (ipotesi dell'elettrone «rotante»). Piú tardi si trovò che questa è una proprietà fondamentale di tutte le particelle della fisica; lo spin di una particella può assumere solo valori

Tabella 2.

Configurazioni elettroniche fondamentali. Nella testata il primo numero indica il numero quantico totale, n; la lettera il numero quantico azimutale, l, secondo la convenzione degli spettroscopisti: $s = 1$, $p = 2$, $d = 3$, $f = 4$, $g = 5$, e cosí via. I numeri nelle colonne indicano gli elettroni nei diversi stati, corrispondenti alla configurazione di minima energia.

Atomo	*1s*	*2s*	*2p*	*3s*	*3p*	*3d*	*4s*	*4p*	*4d*	*4f*	*5s*
1 H	1										
2 He	2										
3 Li	2	1									
4 Be	2	2									
5 B	2	2	1								
6 C	2	2	2								
7 N	2	2	3								
8 O	2	2	4								
9 F	2	2	5								
10 Ne	2	2	6								
11 Na	Configu-			1							
12 Mg	razione			2							
13 Al	del Ne			2	1						
14 Si	(10)			2	2						
15 P				2	3						
16 S				2	4						
17 Cl				2	5						
18 A				2	6						
19 K	Configurazione						1				
20 Ca	dell'A (18)						2				
21 Sc						1	2				
22 Ti						2	2				
23 V						3	2				
24 Cr						5	1				
25 Mn						5	2				
26 Fe						6	2				
27 Co						7	2				
28 Ni						8	2				
29 Cu						10	1				
30 Zn						10	2				
31 Ga						10	2	1			
32 Ge						10	2	2			
33 As						10	2	3			
34 Se						10	2	4			
35 Br						10	2	5			
36 Kr						10	2	6			
37 Rb	Configurazione del Kr (36)										1
38 Sr											2
39 Y									1		2
40 Zr									2		2
41 Nb									4		1
42 Mo									5		1
43 Tc									5		2
44 Ru									7		1
45 Rh									8		1
46 Pd									10		

Atomo		*4f*	*5s*	*5p*	*5d*	*5f*	*6s*	*6p*	*6d*	*7s*
47 Ag	Configu-		1							
48 Cd	razione		2							
49 In	del Pd		2	1						
50 Sn	(46)		2	2						
51 Sb			2	3						
52 Te			2	4						
53 I			2	5						
54 Xe			2	6						
55 Cs			2	6			1			
56 Ba			2	6			2			
57 La			2	6	1		2			
58 Ce		1	2	6	1		2			
59 Pr		3	2	6			2			
60 Nd		4	2	6			2			
61 Pm		5	2	6			2			
62 Sm		6	2	6			2			
63 Eu		7	2	6			2			
64 Gd		7	2	6	1		2			
65 Tb		9	2	6			2			
66 Dy		10	2	6			2			
67 Ho		11	2	6			2			
68 Er		12	2	6			2			
69 Tm		13	2	6			2			
70 Yb		14	2	6			2			
71 Lu	(68)				1		2			
72 Hf					2		2			
73 Ta					3		2			
74 W					4		2			
75 Re					5		2			
76 Os					6		2			
77 Ir					7		2			
78 Pt					9		1			
79 Au					10		1			
80 Hg	(78)						2			
81 Tl							2	1		
82 Pb							2	2		
83 Bi							2	3		
84 Po							2	4		
85 At							2	5		
86 Rn							2	6		
87 Fr							2	6		1
88 Ra							2	6		2
89 Ac							2	6	1	2
90 Th							2	6	2	2
91 Pa						2	2	6	1	2
92 U						3	2	6	1	2
93 Np						4	2	6	1	2
94 Pu						6	2	6		2
95 Am						7	2	6		2
96 Cm						7	2	6	1	2

interi (0, 1, 2, ...) o seminteri (1/2, 3/2, 5/2, ...), assumendo come unità di spin $\hbar = h/2\pi$. Lo spin delle particelle è associato a uno dei piú importanti principî della fisica atomica, il cosiddetto «principio di esclusione» o «principio di Pauli»: in un sistema contenente piú particelle con spin semintero non vi possono mai essere due particelle identiche (per esempio, due elettroni) nello stesso stato. In particolare, fissata un'orbita – cioè una terna di numeri quantici n, l, m – vi possono essere in essa due elettroni, ma non piú di due: uno con lo spin parallelo e l'altro con lo spin antiparallelo al momento orbitale. Il principio di esclusione non si applica alle particelle con spin intero.

È straordinario come con queste regole si possano spiegare tutte le proprietà spettroscopiche degli elementi, almeno qualitativamente. Per l'H si trova che le energie dipendono solo dal numero n, secondo la semplice equazione

$$E_n = -\frac{2\pi^2 me^4}{h^2}\frac{1}{n^2} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

dove m ed e sono la massa e la carica dell'elettrone e h la costante di Planck. Le frequenze delle varie serie spettrali si ottengono da questa equazione applicando la seconda legge di Bohr $\nu = (E_p - E_n)/h$. Per esempio la serie di Lyman si ricava ponendo $n = 1$ e $p = 2, 3, 4, \ldots$:

$$\nu_{Ly} = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3}\left(1 - \frac{1}{p^2}\right);$$

la serie di Balmer, ponendo $n = 2$, $p = 3, 4, 5, \ldots$:

$$\nu_{Bal} = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{p^2}\right);$$

e cosí via.

L'esistenza di orbite o «stati» elettronici con i valori previsti dell'energia sono stati messi in evidenza direttamente nelle esperienze di Franck e Hertz e di Stern e Gerlach.

La spiegazione del sistema periodico si ricava dalla enumerazione degli stati possibili – cioè delle terne possibili di numeri quantici n, l, m – osservando che se si procede dall'idrogeno verso atomi piú pesanti, aggiungendo via via un elettrone dopo l'altro (e aumentando ogni volta di un'unità la carica del nucleo), ogni nuovo elettrone deve andare a disporsi nello stato di energia piú basso compatibile con il principio di Pauli. Quindi il primo elettrone va in uno stato $n = 1$, $l = 0$ (stato 1, 0); nell'atomo di He il secondo elettrone può ancora disporsi in uno stato (1, 0), ma nell'atomo successivo, Li, il terzo elettrone deve occupare uno stato (2, 0), perché gli stati (1, 0) sono già tutti e due occupati. Con il Be ($Z = 4$) si occupa anche il secondo stato (2, 0), di modo che nell'atomo di B ($Z = 5$) il quinto elettrone ha solo disponibile uno stato (2, 1); di questi ve ne sono sei, che vengono occupati uno dopo l'altro negli atomi di B, C, N, O, F e Ne. Con l'atomo successivo, Na ($Z = 11$) si comincia con uno stato (3, 0) e cosí via, come indicato nella tabella 2. Si noterà che l'ordine di riempimento degli

stati non sembra rigoroso; le apparenti eccezioni sono spiegate da una teoria piú raffinata.

Gli atomi con i numeri «magici» $Z = 2$ (He), 10 (Ne), 18 (Ar), 36 (Kr), 54 (Xe) corrispondono a configurazioni particolari, in cui sono riempiti tutti gli stati con $n = 1, 2, 3, \ldots$: configurazioni o «gusci» (*shells*) chiusi. Ciò conferisce a questi atomi una stabilità eccezionale rispetto agli atomi che li precedono o li seguono (cfr. fig. 2); questo è il motivo per cui questi atomi (gas rari o nobili) hanno scarsissima affinità chimica. Gli atomi che li precedono (alogeni) hanno un elettrone di meno di quel che occorre per chiudere la configurazione, mentre quelli che li seguono (metalli alcalini) ne hanno uno fuori della configurazione chiusa; perciò i primi tendono ad aggregarsi un elettrone extra divenendo ioni negativi, mentre i secondi tendono a perdere un elettrone divenendo ioni positivi. L'unione di questi ioni negativi e positivi forma gli alogenuri alcalini, come il cloruro di sodio (NaCl). Questo è un caso particolarmente semplice di legame chimico, ma la teoria è in grado di spiegare anche casi piú complicati e perfino di predire la posizione nello spazio di componenti di molecole alquanto complesse.

Questi brillanti risultati della teoria convinsero rapidamente i fisici che il modello di Rutherford-Bohr doveva possedere un contenuto di realtà, cioè andava piú in là di un semplice schema di comodo; pertanto il problema urgente della

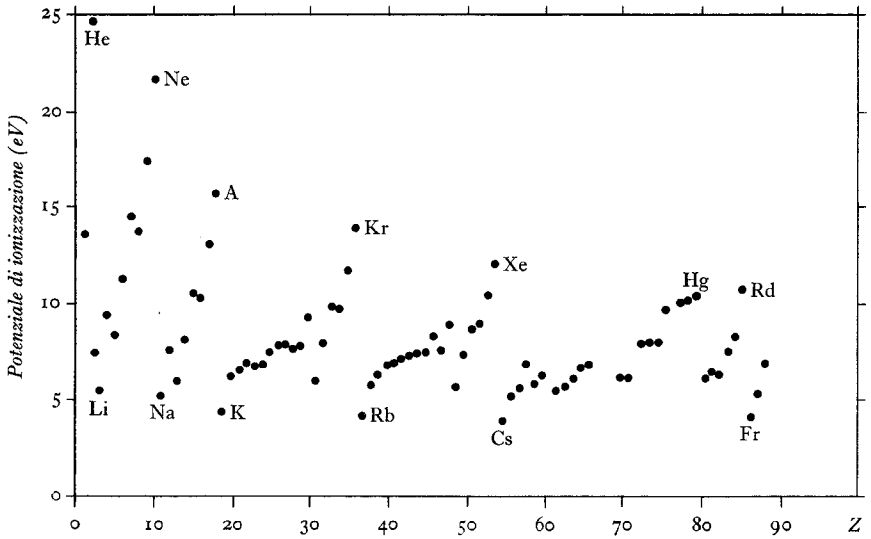


Figura 2.

Potenziali di ionizzazione in funzione di Z. Il potenziale di ionizzazione è l'energia necessaria per estrarre un elettrone dall'atomo espressa in eV. Si noti l'elevato potenziale di ionizzazione dei gas nobili, $_2$He, $_{10}$Ne, $_{18}$A, $_{36}$Kr, $_{54}$Xe e il basso potenziale dei metalli alcalini $_3$Li, $_{11}$Na, $_{19}$K, $_{37}$Rb, $_{55}$Cs.

fisica era quello di dare una formulazione coerente della teoria atomica, basandosi su questo modello, anche a costo di modificare in modo radicale i concetti fisici ricavati dalla meccanica e dall'elettromagnetismo dei fenomeni macroscopici.

7. *La nuova fisica: relatività e meccanica quantistica.*

Nell'intervallo di tempo tra la spiegazione di Planck delle proprietà del corpo nero e la formulazione (provvisoria) della fisica atomica da parte di Bohr, si erano verificati vari avvenimenti d'importanza decisiva per la concezione attuale di materia. Delle scoperte riguardanti la radioattività e di quelle – in gran parte successive – relative ai nuclei atomici si parlerà piú avanti; in questo paragrafo è necessario soffermarsi brevemente sulla teoria della relatività e, un poco piú a lungo, sul superamento delle difficoltà inerenti alla teoria di Bohr.

La teoria della relatività si deve quasi esclusivamente al genio di un singolo individuo: Albert Einstein; essa si riferisce piú propriamente alle nozioni fisiche di «spazio» e di «tempo», ma queste sono cosí strettamente legate a quella di materia che almeno un breve cenno è indispensabile. La teoria della relatività «speciale» o «ristretta» sorge dalla necessità di dare una descrizione unitaria dei fenomeni meccanici ed elettromagnetici. Brevemente, la meccanica galileo-newtoniana assume che la descrizione dei fenomeni meccanici da parte di due osservatori in moto relativo uniforme e rettilineo sia totalmente equivalente, di modo che nessuna esperienza (meccanica) possa rivelare quale dei due è in quiete e quale si muove. A priori non c'è motivo di pensare che lo stesso debba accadere per i fenomeni elettromagnetici, per esempio per la propagazione della luce (nel vuoto); in effetti, applicando le regole della meccanica alla propagazione della luce si trova che dovrebbe esistere un sistema di riferimento privilegiato o «assoluto» – associato a un ipotetico «etere cosmico» – che dovrebbe essere possibile mettere in evidenza mediante opportuni esperimenti. Perciò nell'ultimo quarto del secolo scorso vi furono molti tentativi diretti a rivelare il moto della Terra rispetto all'etere, di cui il piú noto è quello effettuato nel 1887 da Michelson e Morley. Questi esperimenti ebbero tutti esito negativo: nessun esperimento (meccanico o elettromagnetico) è in grado di rivelare il moto rispetto all'etere o, piú in generale, una differenza tra due sistemi di riferimento in moto rettilineo e uniforme uno rispetto all'altro.

Nel ricercare la ragione del fallimento di questi esperimenti, l'olandese Hendrik Antoon Lorentz scoprí nel 1895 che se si supponeva che i risultati delle misure di tempo da parte di due osservatori in moto relativo possano differire tra loro, quando essi effettuano esperimenti elettromagnetici, il risultato negativo dell'esperimento di Michelson e Morley diviene spiegabile. In altre parole ci dovrebbero essere due «specie» di tempo: un tempo «universale» o «assoluto», identico per tutti gli osservatori, da impiegare per descrivere i fenomeni meccanici, e un tempo «locale», differente da un osservatore all'altro, che serve per descrivere i fenomeni elettromagnetici. Naturalmente quest'idea di due tipi di tem-

po non è accettabile, ma occorsero dieci anni e il genio di Einstein perché qualcuno avesse il coraggio di affermare che era necessario modificare le leggi della meccanica in modo da poter usare in ambedue i casi il tempo locale di Lorentz; la modifica ha un effetto assolutamente impercettibile in tutti i casi in cui le velocità sono piccole rispetto alla velocità della luce nel vuoto, ma diviene importante quando le velocità sono grandi. In particolare l'inerzia dei corpi, cioè la loro massa, cresce con la velocità e diventerebbe infinitamente grande se la velocità raggiungesse quella della luce; perciò nessun corpo materiale può muoversi con la velocità della luce.

Questo risultato ha un'attinenza diretta al concetto di materia, perché ancora al principio di questo secolo si insegnava che la massa è «la quantità di materia» di un corpo; sembrava, ora, che la materia potesse per cosí dire «smaterializzarsi» diventando energia e l'energia potesse in qualche modo materializzarsi. Ma in tal caso che differenza c'è tra materia e energia? La situazione sembrava identica a quello che si presentò a metà del secolo scorso quando si scoprí che il calore era una delle tante forme sotto cui si presenta l'energia. Risorgevano problemi metafisici dimenticati sulla natura delle cose. È inutile aggiungere che, quale che sia l'importanza che si vuole attribuire a questi problemi, le conferme sperimentali della teoria della relatività e, in particolare, dell'equivalenza della massa e dell'energia sono oggi numerosissime e completamente convincenti.

La teoria della relatività «generale» è, invece, una teoria del campo gravitazionale; essa interessa il concetto di materia, in quanto i corpi sono anche sorgenti di campi gravitazionali. Nella teoria della relatività generale il concetto primario è quello di «campo», non quello di materia; gravitazione e inerzia non sono due cose diverse, ma due manifestazioni dei campi gravitazionali dei corpi. La teoria einsteiniana del campo gravitazionale possiede un'eleganza matematica di straordinaria bellezza; specie negli anni recenti si sono anche accumulate numerose prove sperimentali in suo favore. Tuttavia, malgrado i molti tentativi dello stesso Einstein e altri, essa rimase un corpo distaccato dal resto della fisica, che si è sviluppato in maniera indipendente, e ancora non è stato scoperto come inserirlo nel corpo principale (si veda l'articolo «Gravitazione» in questa stessa *Enciclopedia* per maggiori notizie sulla teoria della relatività generale).

Verso il principio degli anni '20 la situazione era dunque la seguente: c'era un modello atomico – quello di Rutherford-Bohr – abbastanza semplice e confermato da molti esperimenti diretti e indiretti, ma per renderlo compatibile con la meccanica – classica o relativistica – e con l'elettromagnetismo era necessario postulare certe regole – la teoria delle orbite di Bohr – che non avevano alcuna giustificazione, anzi erano altrettanto incomprensibili quanto l'ipotesi di Planck, con la quale avevano un'evidente affinità. Da un punto di vista epistemologico, mentre non si poneva il problema della «realtà» del modello, era urgente dare una formulazione coerente delle teorie di Bohr e di Planck, possibilmente conciliabile con le proprietà del campo elettromagnetico. Inoltre si affacciava un'altra questione: quale è la natura della massa delle particelle (elettroni o nuclei, o eventuali componenti di questi ultimi)? Se i quanti di Planck – per i quali si andava diffondendo il termine 'fotoni', quasi a sottolineare il fatto che dopo tutto

erano qualcosa di analogo alle altre particelle – si dovevano considerare corpuscoli, la loro massa propria era nulla (perché si muovevano con la velocità della luce), ma a tutti gli effetti si comportavano come se avessero una massa $m_f = h\nu/c^2$ dove c è la velocità della luce; per esempio, la loro quantità di moto era $m_f c = h\nu/c$, come si osserva nell'effetto Compton. Quanto agli elettroni, essi hanno una massa propria non nulla, ma la loro massa «apparente» è variabile con la velocità.

Intorno al 1924 apparvero due tentativi di superare le difficoltà connesse con le orbite di Bohr. Uno di essi, dovuto a Erwin Schrödinger prende le mosse da un'idea di Louis de Broglie: se la luce ha un comportamento diverso quando si propaga (onde) oppure negli scambi energetici con la materia (flusso di fotoni), non potrebbe succedere lo stesso per gli elettroni e altre particelle materiali? In tal caso si può arrischiare la previsione che la lunghezza di queste onde «materiali» sia uguale alla costante di Planck divisa per la quantità di moto, cioè h/mv e questa previsione dovrebbe essere verificabile con esperienze di diffrazione, come si fa con la luce. In effetti gli esperimenti di Davisson e Germer del 1927 si rivelarono in perfetto accordo con le idee di Broglie. Le onde materiali sono dunque una realtà sperimentale, come le onde luminose.

In che modo le onde di Broglie possono spiegare le orbite o, meglio, gli stati quantici? L'idea è relativamente semplice: quando si mette in vibrazione una corda di violino o l'aria contenuta in una canna d'organo, le uniche oscillazioni stabili sono le cosiddette «armoniche», la cui lunghezza d'onda entra un numero intero di volte nella lunghezza della corda o della canna. Se si assume che gli stati quantici corrispondano alle oscillazioni stabili di un sistema atomico, in modo analogo si troverà che queste devono formare un insieme «discreto», che si può mettere in corrispondenza di uno o piú numeri interi. Per trovare l'equazione delle onde corrispondenti a un sistema atomico, Schrödinger si lasciò guidare dall'analogia con le onde luminose (elettromagnetiche) e riuscí a mostrare che in tal modo nel caso dell'atomo d'idrogeno si ritrovano precisamente le energie calcolate con la teoria delle orbite. Le orbite quantiche di Bohr sono cosí sostituite dalle oscillazioni stabili di un sistema vibrante opportuno; gli stati possibili sono quindi quelli stabili. Era indiscutibilmente un progresso, tanto piú che con questo metodo si riuscí a risolvere problemi piú complicati dell'atomo di idrogeno, dove la teoria delle orbite era fallita. Nasceva una strana meccanica, la quale associa a una particella un moto ondulatorio; ma onde di che cosa? Non estendeva questa teoria anche alle particelle materiali lo stesso inesplicabile dualismo trovato per la luce? Per ciò che riguarda l'interpretazione fisica le cose sembravano complicarsi ancor piú, anche se in pratica la meccanica ondulatoria dava risultati eccellenti.

L'altro tentativo, anteriore in ordine di tempo, si deve a Werner Heisenberg; esso si basa su un'idea alquanto piú astratta e, in pratica, è di applicazione assai piú difficile che la meccanica di Schrödinger, pur conducendo ai medesimi risultati. Perché parlare di orbite? si domanda Heisenberg, noi non osserviamo nessuna orbita; in verità non osserviamo neppure gli elettroni nell'atomo, ma solo le energie, i momenti angolari, i momenti magnetici, ecc., di tutto il siste-

ma. Quindi le equazioni della fisica atomica devono riguardare solo relazioni tra queste grandezze, anzi tra i valori possibili di queste grandezze (i valori che esse assumono negli stati quantici). La meccanica delle «matrici», elaborata da Heisenberg – con l'intervento di Born, Jordan e altri – è caratterizzata dal fatto che le grandezze fisiche non sono rappresentate da variabili numeriche, ma da «schemi» o «matrici», ordinate per righe e colonne, coi quali si può operare secondo certe regole di calcolo note da piú di un secolo. L'aspetto piú importante del calcolo delle matrici è che il prodotto non gode necessariamente della proprietà commutativa: se p e q sono due matrici e pq il loro prodotto, può accadere che $pq-qp$ sia diverso da zero; si dice allora che p e q non sono «commutabili».

La grande scoperta di Heisenberg fu appunto che esistono coppie di grandezze fisiche rappresentate da matrici non commutabili; per esempio, se x è la matrice corrispondente a una delle coordinate di un elettrone e $p_x(=mv_x)$ è la matrice corrispondente alla componente della quantità di moto nella direzione x, si trova che $p_x x - x p_x = h/2\pi i$, dove h è la costante di Planck e $i=\sqrt{-1}$ è l'unità immaginaria. Cosa significa fisicamente questa non-commutabilità?

Nel 1926 un gruppo di fisici che comprendeva Bohr, Heisenberg, Schrödinger e altri si riuní a Copenhagen per discutere il significato fisico di queste teorie. «Durante i mesi seguenti queste discussioni, uno studio intensivo di tutti i problemi riferentisi alla interpretazione della teoria dei quanta, in Copenhagen, condusse finalmente a una completa e, come molti fisici credettero, soddisfacente chiarificazione della situazione. Ma non si trattava d'una soluzione che si potesse facilmente accettare. Ricordo delle discussioni con Bohr che si prolungarono per molte ore fino a notte piena e che ci condussero quasi ad uno stato di disperazione; e quando al termine della discussione me ne andavo solo a fare una passeggiata nel parco vicino continuavo sempre a ripropormi il problema: è possibile che la natura sia cosí assurda come ci appariva in quegli esperimenti atomici?» [Heisenberg 1959, trad. it. p. 47].

La soluzione «ortodossa» di queste difficoltà prende appunto il nome di «interpretazione di Copenhagen» e si basa sul significato fisico delle relazioni di non-commutazione delle matrici; queste esprimono il fatto che, se si vogliono misurare contemporaneamente due grandezze rappresentate da matrici non commutabili, non è possibile ridurre gli errori delle misure al di sotto di certi limiti, tali che il loro prodotto sia minore di h. Questa impossibilità non è dovuta a motivi pratici, ma alla natura quantistica dei processi elementari. Per esempio, si supponga di voler misurare contemporaneamente la posizione e la velocità di un elettrone, illuminandolo con un fascio di luce e raccogliendo la luce diffusa, per localizzare il punto in cui è avvenuta la diffusione; nel far questo si commette un errore dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda λ della luce impiegata, di modo che per compiere un errore molto piccolo è necessario usare luce di lunghezza d'onda molto corta (raggi X o γ). Ma, trattandosi di un elettrone, si deve considerare la diffusione di un unico fotone, la cui quantità di moto è $h\nu/c=h/\lambda$. Siccome una parte incognita di questa viene ceduta all'elettrone durante il processo, ne risulta una incertezza nella quantità di moto dell'elettrone uguale a h/λ. Il prodotto delle due incertezze – nella posizione e nella quantità di moto – è, perciò, $\lambda(h/\lambda)=h$. Lo stesso succede per tutti gli esperimenti riguardanti processi elementari (principio di «indeterminazione» o principio di Heisenberg).

Questa è anche la spiegazione del comportamento apparentemente contraddittorio della luce e delle particelle (onde e corpuscoli). In realtà non c'è contraddizione, perché non esiste nessun esperimento che permetta di mettere in evidenza contemporaneamente i due aspetti della luce e della materia, quello corpuscolare e quello ondulatorio; questi non si contraddicono, ma sono complementari, nel senso che la natura risponde a seconda del modo con cui è interrogata: in modo ondulatorio, se si fa un esperimento di propagazione; in modo corpuscolare, se si fa un esperimento di localizzazione. Negli esperimenti macroscopici questo dualismo non appare a causa dell'integrazione statistica di un numero enorme di processi elementari.

Le conseguenze di questi risultati sul modo di valutare la conoscenza del mondo atomico sono di portata straordinaria; tutto il nostro modo di vedere la realtà atomica ne rimane profondamente alterato. Le situazioni sperimentali relative alle dimensioni atomiche non possono essere descritte mediante immagini derivate dall'esperienza ordinaria, ma solo attraverso un formalismo matematico, quello delle matrici o quello della meccanica ondulatoria. Ma forse l'aspetto piú rivoluzionario di questa nuova fisica è che l'interdipendenza tra fenomeni su scala atomica (cioè tra processi elementari) non può piú essere considerata sotto la categoria della «causalità». Si può appena accennare alle discussioni sul «determinismo» in fisica; tra i molti libri sull'argomento si segnala quello di Cassirer [1937], che contiene una eccellente trattazione del problema da un punto di vista neokantiano.

L'arbitrarietà inerente al concetto di relazione causale tra fenomeni non era naturalmente sfuggita a filosofi come Hume e Kant, né a fisici come Laplace e Helmholtz. Nel fluire della realtà si constatano ritmi e regolarità, i quali, espressi sotto la forma di enunciati causali (leggi), formano la base della conoscenza scientifica; ma lo stato presente dell'universo non può mai essere completamente identico a nessuno degli stati che lo hanno preceduto e quindi la ripetizione dei ritmi e la regolarità non sono «perfetti». Come influisce ciò sulle relazioni osservate tra i fenomeni? La convinzione dei deterministi è stata espressa da Laplace nel suo *Essai philosophique sur les probabilités*: «Un'Intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze da cui è animata la natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se per di piú fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei piú grandi corpi dell'universo e dell'atomo piú leggero: nulla sarebbe incerto per essa e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi» [1814, trad. it. p. 243]. Lo spirito umano, però, non può pervenire a una conoscenza cosí perfetta; perciò le sue previsioni non sono cosí certe, ma hanno una probabilità piú o meno grande di verificarsi o di non verificarsi.

Il nuovo punto di vista è ora che l'incertezza della previsione non dipende dall'insufficienza della mente umana, ma dalla natura quantistica dei processi elementari. L'intelligenza di cui parla Laplace non potrebbe fare previsioni piú sicure di quanto è consentito dalle leggi della fisica atomica, perché l'indetermi-

nazione è inerente ai fenomeni; anch'Essa dovrebbe limitarsi ad affermazioni di probabilità. In ciò non v'è nulla di irriverente verso le convinzioni religiose dei credenti; anche san Tommaso afferma che l'Onnipotenza divina si arresta di fronte al principio di contraddizione. Einstein, che non accettò mai l'interpretazione di Copenhagen, dopo che Bohr ebbe ribattuto tutte le sue argomentazioni, non poté far altro che esclamare: «Il buon Dio non gioca ai dadi!» Ma si trattava di una professione di fede, non di un'affermazione scientifica.

Il significato della meccanica ondulatoria è stato messo in luce da Born, Jordan, Heisenberg e altri: la grandezza che oscilla non è qualcosa di osservabile direttamente; il quadrato del suo modulo esprime la probabilità che la misura di una grandezza fisica fornisca un certo risultato. Perciò si parla qualche volta di «onde di probabilità». In un certo senso la fisica moderna supera l'antico dualismo tra continuo e discreto: le onde sono l'aspetto continuo, i corpuscoli l'aspetto discreto di un'unica realtà fisica. Quale dei due aspetti debba apparirci in una certa esperienza dipende da questa.

Una terza formulazione della fisica atomica che completa e sintetizza le due precedenti è dovuta a Dirac; nella sua versione piú completa essa include le modificazioni necessarie per adattare la meccanica quantistica alla teoria della relatività ed è quindi valida anche quando le energie delle particelle sono grandi rispetto alla loro massa propria moltiplicata per il quadrato della velocità della luce. La teoria di Dirac aggiunge due risultati di grandissima importanza per le proprietà delle particelle.

1) Lo spin e, conseguentemente, il principio di Pauli sono automaticamente inseriti nella teoria relativistica e quindi non occorre farne oggetto di particolari postulati (come si faceva nell'ipotesi dell'elettrone rotante). Poiché un insieme di particelle con spin semintero – come gli elettroni – segue le leggi statistiche trovate da Fermi, basate sul principio di esclusione, queste particelle sono chiamate «fermioni». Le particelle con spin intero si chiamano, invece, «bosoni», perché obbediscono alla statistica del fisico indiano Bose. La legge di Planck si ricava direttamente dalla statistica di Bose semplicemente assumendo che i fotoni siano bosoni con spin uguale a 1.

2) Quando si studia il moto di una particella non soggetta a forze con la teoria di Dirac, si trova che oltre alla soluzione corrispondente al moto ordinario esiste una seconda soluzione, nella quale l'energia cinetica ha un valore negativo. Questa seconda soluzione viene interpretata come una «antiparticella», la quale differisce dalla particella ordinaria, perché tutte le sue proprietà fisiche (ma naturalmente non la massa) sono cambiate di segno; in altre parole la teoria prevede che accanto a ogni particella esista un'antiparticella con proprietà simmetriche (per esempio, se la carica della particella è positiva, quella dell'antiparticella sarà negativa). La scoperta da parte di Anderson di una particella di carica positiva, ma con la stessa massa dell'elettrone, avvenuta nel 1932, è una delle piú importanti scoperte della fisica delle particelle e insieme una brillante conferma della teoria di Dirac. La nuova particella fu chiamata «positrone» o «elettrone positivo».

8. *Radioattività e struttura del nucleo.*

Alla fine degli anni '20 si poteva affermare che la struttura dell'atomo era completamente chiarita; la meccanica quantistica aveva raggiunto una completa coerenza, che trova nel celebre libro di Dirac *Principles of Quantum Mechanics* la sua formulazione praticamente definitiva. Era naturale perciò che i fisici rivolgessero la loro attenzione ai problemi del nucleo atomico.

La prima evidenza che i nuclei atomici debbano avere una struttura complessa viene dai fenomeni della radioattività. La scoperta della radioattività si deve a Henri Becquerel che nel 1896 notò l'esistenza di radiazioni provenienti da sali di uranio; ma la radioattività è soprattutto associata ai nomi dei coniugi Curie, che scoprirono numerosi atomi radioattivi, tra cui il radio, e le loro piú importanti proprietà. Come fu chiarito gradualmente nei primi due decenni del secolo, i fenomeni radioattivi consistono nella emissione di tre tipi di «radiazioni» da parte dei nuclei di alcuni atomi, generalmente molto pesanti: 1) i raggi α, che sono costituiti da nuclei di He, espulsi dai nuclei radioattivi con energie enormi; 2) i raggi β, che sono elettroni emessi anch'essi dai nuclei radioattivi con elevatissime energie; 3) i raggi γ, che sono, invece, onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda ancora minore di quella dei raggi X.

Poiché i raggi α e β implicano modificazioni della carica elettrica e – in misura minore per quanto riguarda i raggi – anche della massa dei nuclei da cui avviene l'emissione, questa è accompagnata da una trasformazione spontanea dei nuclei da una specie chimica a un'altra. Un'emissione β trasforma un nucleo in un altro con una carica maggiore per una unità; un'emissione α trasforma un nucleo in uno con una carica minore per due unità, con diminuzione anche della massa. Il nucleo prodotto da un processo radioattivo è spesso, a sua volta, radioattivo; si hanno cosí delle catene o «famiglie» di elementi, i cui membri vengono prodotti uno dopo l'altro da una successione di processi radioattivi, a partire da un elemento progenitore. L'ultimo termine di una famiglia radioattiva è un nucleo stabile, per lo piú un nucleo di piombo ($Z = 82$). Si trova, però, che il peso atomico del piombo proveniente da diverse famiglie radioattive è diverso; ciò dimostra che possono esistere nuclei con la medesima carica elettrica – e quindi con le stesse proprietà chimiche e spettroscopiche – ma con peso atomico differente; questi nuclei furono chiamati «isotopi», perché occupano il medesimo posto nel sistema di Mendeleev.

Quando Thomson e, piú tardi, Aston applicarono i metodi della cosiddetta spettroscopia di massa, si trovò che l'«isotopia» è una proprietà generale: quasi tutti gli elementi sono, in realtà, una mescolanza di diversi isotopi, chimicamente inseparabili. Inoltre i pesi atomici dei singoli isotopi risultarono quasi uguali a multipli interi del peso atomico del nucleo piú leggero conosciuto, quello dell'idrogeno. Dopo la scoperta che l'O è formato da una miscela di tre isotopi, con pesi atomici circa 16, 17 e 18, mescolati rispettivamente nei rapporti 99,76, 0,04 e 0,20 per cento, si convenne di definire l'unità di peso atomico, in maniera tale che quello dell'isotopo ${}_8O^{16}$ risultasse esattamente uguale a 16. (Nell'indicare un

isotopo, il numero in basso che precede il simbolo chimico dell'elemento indica il valore di Z, quello in alto che segue, il valore di A arrotondato all'intero piú vicino). Incominciò cosí a farsi strada l'idea che il nucleo di H – chiamato «protone» – fosse un componente universale di tutti gli altri nuclei. L'ipotesi piú semplice era che in un nucleo di peso atomico A e numero atomico Z vi fossero A protoni e A-Z elettroni, legati molto piú strettamente che gli Z elettroni «esterni» dell'atomo. Come si vedrà, questo modello è contrario ai principî della meccanica quantistica, ma fino al 1932 nessuno avrebbe saputo immaginare qualcosa di meglio.

La radioattività aveva dunque mostrato che almeno in alcuni casi i nuclei di un certo elemento potevano trasformarsi in nuclei di altri elementi, realizzando cosí uno dei sogni degli alchimisti: la trasmutazione degli elementi. In verità, fin dal 1919 Rutherford aveva mostrato che era possibile ottenere delle trasformazioni nucleari anche artificialmente; bombardando l'azoto dell'aria con particelle α di grande energia provenienti dal torio radioattivo, si può ottenere l'isotopo dell'ossigeno di peso 17, ${}_8O^{17}$, liberando nello stesso tempo un protone. Simbolicamente si può indicare questa «reazione nucleare» con ${}_7N^{14}+{}_2He^4 = {}_8O^{17}+{}_1H^1$. Ma questi esperimenti non avevano ricevuto una grande accoglienza nell'ambiente scientifico, sia perché l'evidenza sperimentale non era molto convincente e sia, forse, perché i fisici piú disposti ad accettare idee nuove erano distratti dai problemi della meccanica quantistica, che allora stava sorgendo. È da notare che in questa circostanza a Cambridge si cominciò a parlare di una possibile «particella neutra» come un costituente dei nuclei, accanto al protone; questa particella sarebbe stata formata da una specie di fusione di un protone e di un elettrone.

D'altra parte con l'affermarsi della meccanica quantistica divenne evidente che non era possibile pensare all'elettrone come costituente dei nuclei sotto nessuna forma. Per esempio, anche ammettendo che l'elettrone nel nucleo si movesse con una velocità uguale a quella della luce, la lunghezza d'onda di Louis de Broglie corrispondente – la cosiddetta lunghezza d'onda Compton – sarebbe risultata mille volte maggiore delle dimensioni nucleari. Ancora piú grave era la difficoltà relativa allo spin: nell'ipotesi che il nucleo fosse formato da protoni ed elettroni, il numero totale di particelle nel nucleo sarebbe stato $A+(A-Z)$, cioè $2A-Z$, che è pari o dispari, a seconda che Z sia pari o dispari. Siccome il protone e l'elettrone hanno entrambi uno spin uguale a 1/2 (in unità $\hbar$), ne viene che i nuclei con Z pari avrebbero dovuto avere spin intero e quelli con Z dispari spin semintero, a causa delle regole quantistiche sull'orientamento dei momenti angolari; in pratica si trova, invece, che lo spin è intero se A è pari, semintero se A è dispari.

Si giunge cosí al 1932, anno in cui vennero compiute due memorabili scoperte che rivoluzionarono la fisica del nucleo e delle particelle. La prima di queste si deve a un brillante allievo di Rutherford, James Chadwick, il quale mostrò che da una sorgente formata dall'elemento radioattivo polonio (Po) mescolato a polvere di Be escono delle particelle neutre, di massa circa uguale a quella del protone. La stessa cosa era stata osservata qualche mese prima da Frédéric Joliot

e Irène Joliot-Curie, che però ne avevano data un'interpretazione sbagliata. La nuova particella fu chiamata «neutrone» e da varie parti fu immediatamente suggerito che il neutrone doveva essere precisamente l'altro costituente del nucleo atomico. In tal modo un nucleo di peso A e carica Z risulta formato da Z protoni e da $N = A - Z$ neutroni. Basta poi assumere che anche il neutrone abbia uno spin 1/2 per spiegare senza difficoltà la regola dello spin. Il numero atomico Z acquista cosí una terza interpretazione: esso è uguale al numero di protoni nel nucleo; A (o, meglio, il numero intero piú vicino ad A) è il numero totale di nucleoni del nucleo; due isotopi hanno lo stesso numero di protoni ma un diverso numero di neutroni.

L'altra scoperta, quella del positrone, è stata già ricordata nel paragrafo precedente. Il positrone fu scoperto per la prima volta nella radiazione cosmica. I «raggi cosmici» sono formati da particelle di altissima energia provenienti dallo spazio, le quali penetrano nell'atmosfera dando luogo a fenomeni di ionizzazione e ad altri importanti processi; prima dell'invenzione delle grandi macchine acceleratrici essi erano l'unica sorgente di particelle di energia molto grande e come tali hanno avuto una grandissima importanza nello sviluppo della fisica delle alte energie, anche se la loro origine non è neppure oggi del tutto chiara. Uno dei fenomeni piú interessanti scoperti nello studio della radiazione cosmica fu quello della creazione contemporanea di «coppie» elettrone-positrone al passaggio di fotoni di energia sufficientemente elevata (raggi γ) attraverso la materia. Piú tardi si scoprirono altre antiparticelle: l'antiprotone fu trovato da Emilio Segrè e dai suoi collaboratori nel 1955 a mezzo di una delle macchine acceleratrici entrate in funzione dopo la guerra.

Le due scoperte del neutrone e del positrone fanno un poco passare in seconda linea quella dell'isotopo pesante dell'idrogeno o «deuterio», avvenuta pure nel 1932 ad opera di Harold C. Urey e dei suoi collaboratori. Per la struttura della materia l'importanza del deuterio – il cui nucleo è formato da un protone e da un neutrone – sta nel fatto che si tratta del sistema nucleare piú semplice possibile e quindi le sue proprietà si prestano ottimamente per una verifica delle teorie sulla struttura del nucleo.

Poco dopo la scoperta del neutrone diverse leggi delle «forze nucleari» – cioè delle forze che tengono uniti i nucleoni nel nucleo – furono proposte indipendentemente da Heisenberg, Majorana, Wigner e anche altri fisici. Sul problema dei campi e delle interazioni tra particelle si dovrà ritornare piú avanti; per ora è sufficiente osservare che la forza tra nucleoni non può essere il campo elettromagnetico, perché i neutroni non possiedono carica, anzi il campo elettrico tra i protoni tende a separare i nucleoni. Il campo nucleare prevale su quello elettromagnetico a distanze inferiori alle dimensioni nucleari (minori cioè di 10^{-13} cm) e si annulla molto rapidamente a distanze maggiori; esso viene generalmente designato col nome di «interazione forte». Un altro tipo d'interazione nucleare – che non è una forza nel senso ordinario della parola – fu introdotto quasi contemporaneamente da Fermi per spiegare il fenomeno della radioattività β: la cosiddetta «interazione debole».

Essendo ormai evidente che nei nuclei non esistono elettroni, l'emissione β

da parte di nuclei radioattivi non poteva essere prodotta che dalla trasformazione di un neutrone in protone con la «creazione» simultanea di un elettrone; in effetti questo processo si verifica anche nel caso di neutroni isolati. A parte però la difficoltà di comprendere come particelle potessero essere «create» (la creazione di coppie elettrone-positrone fu scoperta solo alcuni anni piú tardi da Blackett e Occhialini), c'erano apparentemente delle difficoltà con la conservazione dell'energia e del momento angolare (spin); infatti gli elettroni emessi da un dato elemento radioattivo non hanno tutti la stessa energia. Inoltre, prima della trasformazione si ha una sola particella, il neutrone, con spin 1/2, e dopo ve ne sono due, un protone e un elettrone, entrambi con spin 1/2. La difficoltà era stata riconosciuta ancora prima della scoperta del neutrone e la situazione sembrava cosí disperata che nel 1930 Bohr aveva suggerito la possibilità che in questi fenomeni l'energia fosse conservata solo statisticamente, cioè in media e non nei processi singoli. Fu Pauli a trovare la soluzione con una ipotesi apparentemente assai strana: nell'emissione β interviene ancora una particella senza carica elettrica e – cosa abbastanza difficile da intendere – senza massa propria; la particella di Pauli fu chiamata «neutrino», ha uno spin 1/2 e, non possedendo massa, può muoversi solo con la velocità della luce. Per queste sue proprietà essa è assai difficilmente osservabile e in effetti l'evidenza sperimentale dell'esistenza del neutrino si ebbe solo nel 1956 (Cowan e Reines).

Nella radioattività β un neutrone si trasforma in protone e, contemporaneamente, vengono create due particelle: un elettrone e un neutrino, anzi un «antineutrino»; cosí la creazione simultanea di una particella (l'elettrone) e di un'antiparticella (l'antineutrino) lascia costante il numero totale di particelle dell'universo. Il neutrino è responsabile del bilancio dell'energia, dello spin e anche della quantità di moto. La teoria di Fermi dà una formulazione quantitativa di questo insieme di processi. In questa teoria il protone e il neutrone non sono considerate come due particelle diverse, ma due «stati» di un'unica entità, il nucleone – che fin d'ora appare come una struttura complessa, appunto perché può presentarsi in due stati diversi – precisamente come due stati di un atomo che differiscano per uno dei numeri quantici. Come un atomo può passare da uno stato all'altro con l'emissione di un fotone, cosí nel caso del nucleone il passaggio dallo «stato neutrone» allo «stato protone» avviene con l'emissione di una coppia elettrone-antineutrino. La differenza di energia tra i due stati nel caso atomico è dovuta al campo elettromagnetico, nel caso nucleonico all'interazione debole. Si noti, però, che l'interazione debole, oltre a determinare tra gli stati una differenza di energia e di spin, può determinare – come fa appunto in questo caso – anche una differenza di carica elettrica.

Le nostre idee sulla materia si arricchiscono cosí non solo dalla conoscenza di nuove particelle, ma anche da quella di nuovi campi, con il loro modo di agire. Oltre che mediante la gravità e l'elettromagnetismo, le parti costituenti della materia agiscono tra loro attraverso l'interazione forte e l'interazione debole. Ciò dà luogo a fenomeni che si manifestano anche macroscopicamente, ma dipendono da processi che si svolgono in un piano della realtà fisica che sta al di sotto di quello atomico e lo condiziona: il mondo del nucleo. C'è una differenza fondamentale

tra i tre mondi, quello della realtà quotidiana (macroscopica), quello dell'atomo e quello del nucleo: l'ordine di grandezza delle energie che prendono parte ai processi, o, meglio, il rapporto tra queste energie e quelle corrispondenti alla massa propria delle particelle. Due palle da bigliardo che si scontrano con una velocità di 1 m/s si scambiano una quantità di energia che è una frazione di quella corrispondente alla loro massa propria, pari al quadrato della loro velocità divisa per il quadrato della velocità della luce, cioè $(3 \times 10^8)^{-2}$, circa 10^{-17}, una quantità assolutamente impercettibile. Anche lo scontro di due treni alla velocità di 100 km/h sviluppa appena un'energia pari 3×10^{-14} volte quella contenuta nella loro massa. È chiaro perciò che nella fisica di ogni giorno le due entità fondamentali, energia e materia, debbano apparire come due cose differenti, nel senso che non c'è praticamente transizione di una quantità apprezzabile di materia allo stato di energia. È come se una persona non avesse mai assistito allo sciogliersi del ghiaccio; difficilmente potrebbe convincersi che acqua e ghiaccio sono in realtà la stessa cosa.

Nel mondo atomico la situazione è un poco diversa: la massa di un atomo di idrogeno è un poco minore della somma delle masse del protone e dell'elettrone, perché per separarli è necessario spendere una certa quantità di energia, per vin-

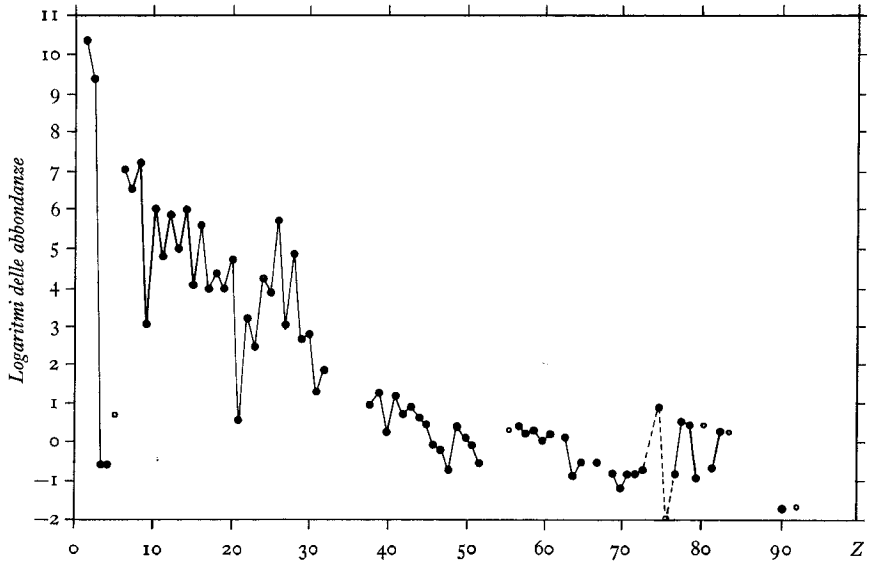


Figura 3.

Abbondanza degli elementi in funzione di Z. L'andamento a zigzag del diagramma dipende dalla maggiore stabilità degli elementi con Z pari. È da notare la grande stabilità del gruppo del Fe (Z=26) e del Pb. I dati provengono da una compilazione da varie fonti astrofisiche.

cere la forza elettrostatica che li tiene uniti entro l'atomo. Questa energia è di 13,6 eV (1 eV o elettronvolt è l'energia acquistata da un elettrone nell'attraversare una differenza di potenziale di 1 volt), mentre la massa di un atomo di H equivale a 939 MeV (1 MeV = 10^6 eV); il rapporto è quindi decine o migliaia di milioni di volte piú favorevole che nei fenomeni fisici ordinari, ma è sempre estremamente piccolo: 10^{-8}. Anche nei processi atomici e molecolari – cioè in tutte le trasformazioni chimiche – occorrerebbe una precisione molto superiore a quella delle misure ordinarie per riconoscere il fatto che la materia può passare allo stato di energia.

Nel mondo nucleare la situazione cambia: la massa del nucleo di deuterio è minore della somma delle masse del protone e del neutrone; la differenza equivale a 1,70 MeV e questa è appunto l'energia necessaria per rompere il nucleo di deuterio e separarlo nei suoi componenti, vincendo l'interazione forte che li tiene legati. Questo è circa lo 0,18 per cento dell'energia corrispondente alla massa del nucleo di deuterio, una frazione ancora piccola, ma non piú trascurabile. Naturalmente questo è il motivo dell'enorme rendimento energetico dei processi nucleari, ma qui interessa essenzialmente il fatto che nel mondo nucleare i concetti di materia e di energia appaiono sotto una nuova luce, perché la loro equivalenza diviene ora evidente. La «realtà» di questo mondo nucleare è dimostrata,

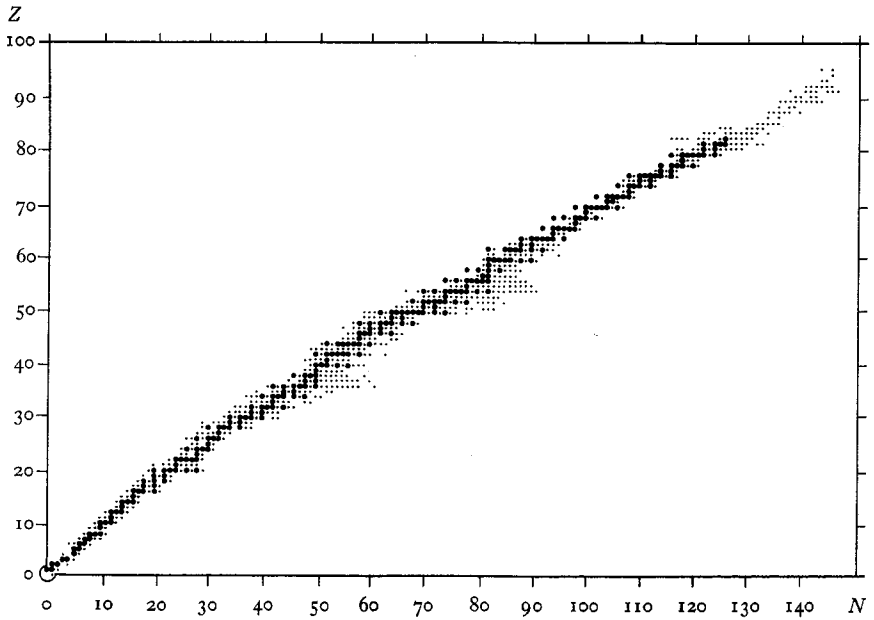


Figura 4.
Nuclei stabili nel diagramma N-Z. I nuclei stabili sono indicati con punti piú grossi, quelli radioattivi con punti piccoli.

purtroppo, macroscopicamente da avvenimenti come lo scoppio di Hiroshima; d'altra parte ad esso è dovuta la nostra esistenza, perché da processi di questo tipo le stelle e il Sole ricavano il calore che irradiano nello spazio.

Malgrado queste differenze e il fatto che accanto all'elettromagnetismo si debbano considerare anche le interazioni forte e debole, non si è trovato necessario modificare le leggi della meccanica quantistica per adattarle al mondo nucleare. Perciò, sotto vari aspetti, la fisica del nucleo è una replica della fisica atomica; per esempio, si ritrovano nelle strutture nucleari periodicità analoghe a quelle che dànno luogo alla tabella di Mendeleev. Vi sono nuclei con numeri «magici» – 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 – di protoni o di neutroni corrispondenti a configurazioni «chiuse» e quindi particolarmente stabili; notevoli sono i nuclei «doppiamente magici», $Z = 8$, $N = 8$ e $Z = 82$, $N = 126$. Questi nuclei corrispondono agli elementi piú abbondanti in natura (cfr. fig. 3).

Le proprietà di stabilità dei nuclei si rappresentano efficacemente in un diagramma avente come ascisse il numero N di neutroni e come ordinate il numero Z di protoni per nucleo (cfr. fig. 4). I nuclei piú leggeri si dispongono intorno a una retta a 45°, perché le configurazioni piú stabili tendono ad avere numeri uguali di neutroni e di protoni. Al crescere di $A = Z + P$ le configurazioni piú stabili devono corrispondere a un numero di protoni minore di quello dei neutroni, a causa della repulsione elettrostatica tra particelle cariche. Per questo motivo l'energia di legame per nucleone diviene sempre minore al crescere di A al di sopra degli elementi del gruppo del Fe; gli elementi piú pesanti finiscono col divenire instabili, tanto che in natura non esistono elementi con $Z > 92$ (uranio). Elementi «transuranici» fino a $Z = 104$ sono stati ottenuti artificialmente in laboratorio irradiando con neutroni nuclei di uranio; si ritiene possibile che intorno a $Z = 114$ possano esistere altri nuclei relativamente stabili.

9. *Le particelle elementari e i quark.*

Con la fine della seconda guerra mondiale la fisica della materia entra in una nuova fase. Come si è visto, non solo l'atomo, ma anche il nucleo atomico si era rivelato una struttura composta da due particelle: il protone e il neutrone; un'altra particella era già da tempo conosciuta come una componente universale degli atomi, l'elettrone, e nei raggi cosmici era stata scoperta la sua antiparticella, il positrone. Infine, per ragioni teoriche, che apparivano ben fondate e saranno confermate piú tardi dall'esperienza, si era trovato necessario postulare l'esistenza di un'altra particella, il neutrino. Si può notare che tutte queste particelle – che sembrano costituire il mondo atomico e nucleare – appartengono alla categoria di quelle chiamate sopra «fermioni» (particelle con spin semintero). Secondo la meccanica quantistica, anche il campo elettromagnetico sembra risolversi in particelle o corpuscoli, i fotoni, che peraltro appartengono alla classe dei «bosoni». Neutrini e fotoni hanno massa nulla, ma spin diverso da zero.

Fin dal 1937 – cioè poco prima dello scoppio della guerra – era però divenuta evidente l'esistenza nella radiazione cosmica di un'altra classe di particelle, la cui

massa era intermedia tra quella dell'elettrone e quella del protone, le quali furono, perciò, chiamate «mesotroni», abbreviato poi in «mesoni». Queste nuove particelle rassomigliavano sotto certi aspetti a quelle predette dal fisico giapponese Hideki Yukawa in una sua teoria delle forze nucleari, che si ispira a un'idea contenuta già nella teoria di Fermi della radioattività β e fondamentale per la moderna teoria quantistica dei campi.

Secondo la legge di Coulomb due corpi carichi di elettricità si respingono oppure si attirano – a seconda che le cariche sono di segno uguale o di segno contrario – con una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Questo enunciato non tiene conto, però, del fatto che qualunque cambiamento nella situazione di uno dei due corpi non è risentito dall'altro istantaneamente, ma solo dopo un certo tempo, perché le azioni elettriche si trasmettono con la velocità della luce. Si supponga, perciò, di mettere in moto uno dei due corpi, comunicandogli una certa energia cinetica e una certa quantità di moto; l'altro corpo risentirà il cambiamento e, se è libero di farlo, si metterà anch'esso in moto, sia pure con un certo ritardo. Ciò significa che tramite il campo elettrico è avvenuta una trasmissione di energia e di quantità di moto tra i due corpi, trasmissione che impiega un certo tempo. Dove si trovano l'energia e la quantità di moto durante questo tempo?

Naturalmente la teoria «classica» del campo elettromagnetico mostra che se un corpo carico viene accelerato, parte da esso un sistema di onde elettromagnetiche che trasportano energia e quantità di moto; onde che quantisticamente sono anche equivalenti a un flusso di fotoni di energia $h\nu$ e quantità di moto $h\nu/c$ se ν è la frequenza delle onde, h la costante di Planck e c la velocità della luce nel vuoto. Secondo la teoria quantistica dei campi, anche nel caso elettrostatico l'azione (la forza di Coulomb) è trasmessa per mezzo di fotoni; solo che se non vi sono cambiamenti (accelerazioni) l'energia e la quantità di moto che le cariche si scambiano si compensano perfettamente e non c'è trasporto effettivo di grandezze meccaniche dall'una all'altra; si dice perciò che in questo caso i fotoni scambiati sono «virtuali». Un cambiamento di distanza produrrebbe uno scompenso, perché un corpo si accorge, per cosí dire, che l'altro si è mosso con un certo ritardo e ciò origina la forza del campo.

In questa rappresentazione delle interazioni viene cosí eliminata l'antica nozione dell'azione a distanza; qualunque interazione – non solo quella elettromagnetica – è concepita come uno scambio di «quanti» caratteristici del particolare campo, i quali trasportano da una particella interagente all'altra energia, quantità di moto, momento angolare (spin) e anche eventualmente cariche elettriche e altre grandezze. I quanti si comportano come bosoni e possono avere anche una massa propria non nulla, la quale determina il raggio d'azione del campo: se la massa propria è nulla – come nel caso dei fotoni – la forza corrispondente è inversamente proporzionale al quadrato della distanza o, piú esattamente, il raggio d'azione è infinitamente grande; se la massa dei quanti è diversa da zero, il raggio d'azione è finito.

Nella teoria di Yukawa – che peraltro non è completa, secondo le idee attuali – l'interazione forte tra nucleoni si deve allo scambio di particelle (positive, neutre e negative) con una massa circa 300 volte maggiore di quella dell'elettrone. La scoperta dei mesoni nei raggi cosmici fu, perciò, considerata come una conferma della previsione del fisico giapponese; ma durante la guerra tre giovani fisici italiani, Conversi, Pancini e Piccioni, scoprirono che nel passaggio attraverso la materia i mesoni positivi si comportano diversamente da quelli negativi, e ciò non dovrebbe succedere, poiché le forze nucleari sono indipendenti dalle cariche elettriche. Inoltre i mesoni sono instabili, ma la loro vita media è piú lunga di quella prevista dalla teoria di Yukawa. La spiegazione di queste difficoltà fu trovata poco dopo la guerra, nel 1947, da Lattes, Occhialini e Powell; impiegando la tecnica delle emulsioni nucleari, questi sperimentatori trovarono che esistono in realtà due tipi di particelle con massa intermedia: i mesoni μ o «muoni» con una massa 206,8 volte quella dell'elettrone e i mesoni π o «pioni» con una massa 273 volte quella dell'elettrone per i pioni carichi e 264 volte per i pioni neutri. I pioni sono considerati identici alle particelle di Yukawa, mentre i muoni sono identici agli elettroni, salvo la massa e la loro instabilità. Il termine 'mesoni' non è piú adoperato per i muoni; oltre ai pioni, esso designa altre particelle scoperte in seguito.

I pioni sono instabili; quelli carichi decadono in $2{,}55 \times 10^{-8}$ secondi, dando luogo a un muone e a un neutrino; quelli neutri hanno una vita media assai piú corta, 2×10^{-16} secondi, e si trasformano spontaneamente in due fotoni. Anche i muoni sono instabili e decadono in $2{,}212 \times 10^{-6}$ secondi in un elettrone o in un positrone piú una coppia neutrino-antineutrino; solo vari anni dopo ci si rese conto che i neutrini cosí prodotti non sono identici a quelli emessi nella radioattività β ordinaria; si devono perciò distinguere due tipi di neutrini (e antineutrini) associati rispettivamente all'elettrone, ν_e, e al muone, ν_μ.

Con la scoperta di queste particelle e di altre («iperoni»), che cominciavano ad apparire nei raggi cosmici, nuovi problemi si profilavano per la fisica. Che differenza c'è tra i nucleoni e le altre particelle? per distinguerli dai nuclei si era presa l'abitudine di chiamare «elementari» sia i nucleoni e sia le altre particelle (elettroni, muoni, pioni, neutrini e anche i fotoni), ma erano queste particelle veramente elementari? Il fatto che si trasformavano le une nelle altre non suggeriva piuttosto che si trattasse di strutture complesse? e in tal caso quali erano le «vere» particelle elementari?

La necessità di uno schema o modello divenne urgente, quando l'impiego delle grandi macchine acceleratrici (sincrotroni, protosincrotroni, acceleratori lineari e, recentemente, gli anelli di accumulazione) mostrarono che le cosiddette particelle elementari si contano non a decine, ma a centinaia! Tutte queste particelle sono instabili, con vite medie estremamente brevi – talora meno di 10^{-23} secondi –; esse decadono, eventualmente attraverso stati intermedi, fino a che i prodotti sono le particelle stabili già note: i nucleoni (il neutrone, con una vita media di diciannove minuti, è da considerarsi «stabile»), l'elettrone, i neutrini e le relative antiparticelle; una parte dell'energia si ritrova anche sotto la forma di onde elettromagnetiche (fotoni). Ma il fatto piú sconcertante è che se si cerca di frammentare le particelle in parti piú piccole – come era stato fatto per gli atomi e i nuclei atomici – per verificare se si tratta di strutture complesse e non elemen-

tari, facendole collidere tra loro, si trova che le particelle che si ottengono hanno masse tanto piú alte, quanto maggiore è l'energia di collisione.

Heisenberg descriveva cosí la situazione all'inizio degli anni '60: «I fenomeni si possono descrivere..., dicendo che l'elevata energia cinetica delle particelle che collidono si trasforma in materia entro le particelle emergenti... L'energia può divenire materia assumendo la forma di particella "elementare". Le differenti particelle elementari si possono considerare come forme differenti, in cui può esistere la sostanza elementare, materia o energia» [1966, p. 1]. Queste parole del grande fisico hanno un sapore vagamente aristotelico, ma è chiaro che la fisica si trovava di fronte a un nuovo problema di struttura della materia: quello di un mondo ancora piú lontano dalla realtà ordinaria, in cui l'equivalenza di materia ed energia è completa, perché le quantità di energia in gioco in un singolo processo elementare sono dello stesso ordine di grandezza delle masse proprie delle particelle.

Anche in questo caso, come in quello della struttura dei nuclei, non vi sono ragioni – almeno per ora – di mettere in discussione i principî della meccanica quantistica, ma se si cerca di spiegare le proprietà delle particelle, supponendo che si tratti di strutture o sistemi complessi, si trova che nessuna delle particelle conosciute è «piú elementare» delle altre. Negli ultimi anni, però, si è fatto sempre piú convincente il successo di un modello immaginato indipendentemente nel 1963 da Gell-Mann e Zweig, secondo cui quasi tutte le particelle dette elementari (questo aggettivo sarà d'ora in poi tralasciato) sono formate dall'unione di certe entità, cui è stato dato il nome di «quark» (con i rispettivi «antiquark»). Queste entità sono «ipotetiche», nel senso che non sono ancora state isolate (e forse non lo saranno mai); ciò nonostante la coerenza del modello e le indicazioni sperimentali sono cosí forti che i quark si possono considerare come oggetti «reali» (particelle) non meno degli elettroni.

L'idea basica del modello è che – come è stato accennato a proposito dei nucleoni – le particelle che si osservano non sono «cose» diverse, ma «stati» diversi di una o piú strutture fondamentali, analoghi agli stati quantici di un atomo; come gli stati di un atomo, le particelle si possono organizzare e classificare in «multipletti», a seconda dei valori di certi «numeri quantici». La differenza fondamentale è che mentre gli stati atomici sono determinati unicamente dall'interazione elettromagnetica, nel caso delle particelle si devono prendere in considerazione anche l'interazione forte e l'interazione debole.

La teoria assume due strutture fondamentali formate da tre quark e, rispettivamente, da un quark e da un antiquark; a queste due strutture corrispondono due famiglie di particelle (stati): i «barioni» e i «mesoni». Una terza famiglia, quella degli «antibarioni», formati da tre antiquark, è completamente simmetrica a quella dei barioni e non è necessario prenderla in considerazione; gli antimesoni non si distinguono dai mesoni. Sono barioni i nucleoni (protone, p, e neutrone, n), mentre i pioni (π^+, π^0, π^-) sono mesoni. Barioni e mesoni insieme formano la classe degli «adroni» o particelle a interazione forte, che comprende quasi tutte le particelle conosciute, alcune centinaia. Un'altra classe di particelle è quella dei «leptoni», insensibili all'interazione forte; questa classe comprende

sei membri (con i relativi «antileptoni»): l'elettrone (ordinario o negativo), e^-, il muone, μ^-, e i due neutrini, ν_e e ν_μ; a cui si aggiunge il «leptone τ» scoperto nel 1975 nel laboratorio di Stanford, con una massa maggiore di quella del protone, e il neutrino associato ν_τ. Si ritiene che i leptoni siano entità elementari, come i quark.

Oltre che per la loro massa (propria) – cioè il contenuto energetico misurato in un sistema in cui sono in quiete – le particelle, cioè gli stati barionici e mesonici, si distinguono per i loro numeri quantici, che sono:

1) la carica elettrica, Q, espressa nell'unità naturale e (uguale alla carica del protone), che può assumere solo valori interi positivi, nulli o negativi: 0, 1, 2, ...;
2) lo spin, J, espresso nell'unità naturale $\hbar$, che può assumere solo valori interi: 0, 1, 2, ... (bosoni) o seminteri: 1/2, 3/2, 5/2 ... (fermioni); i mesoni sono bosoni, i barioni – e anche i leptoni – sono fermioni;
3) la «stranezza» (*strangeness*), S, che è un numero quantico assegnato (dapprima in modo arbitrario) a particelle che decadono in un tempo piú lungo di quello che ci si sarebbe aspettato; per esempio, il barione Λ^0 è una particella che decade in 10^{-10} secondi in un protone e un pione π^-, mentre dalla sezione efficace della reazione inversa (cattura di un π^- da parte di un protone) ci si aspetterebbe una vita media molto piú corta. A questa particella è stata perciò assegnata una stranezza -1, mentre per i nucleoni è stato assunto $S = 0$.

Di un quarto numero quantico, il *charm* o «magia», C, si parlerà piú avanti.

Il modello a quark è stato ideato precisamente per spiegare la classificazione delle particelle in base a questi quattro numeri quantici, precisamente come il modello di Bohr spiega la classificazione degli stati di un atomo, che è la base della spettroscopia; il suo esito sta nel fatto che in tal modo è stato possibile classificare centinaia di adroni – e prevederne di nuovi – assumendo semplicemente che i numeri quantici delle particelle siano uguali alla somma dei corrispondenti numeri quantici che le compongono. Nella tabella 3 sono indicati i numeri quantici che si devono assegnare alle quattro «varietà» o «sapori» (*flavors*) di quark che si è trovato necessario postulare finora (cfr., però, oltre). A questo proposito si deve notare che la terminologia dei quark ha un carattere scherzoso, quasi che i fisici non volessero prendere sul serio il modello e ora sia-

Tabella 3.
Numeri quantici dei quark.

Varietà	*B*	*J*	*Q*	*S*	*C*	T_3	*Y*	*Massa (GeV)*
u	1/3	1/2	2/3	0	0	1/2	1/3	0,3
d	1/3	1/2	−1/3	0	0	−1/2	1/3	0,3
s	1/3	1/2	−1/3	−1	0	0	−2/3	0,5
c	1/3	1/2	2/3	0	1	1/2	1/3	1,5

no costretti a farlo loro malgrado. (Quark è una qualità di formaggio tedesco, che si presenta con diversi «sapori» (in inglese *flavor*) e anche con diversi «colori»; anche la parola *charm* 'incanto' o 'magia', riflette la stessa vena scherzosa). Le quattro varietà di quark si sogliono indicare con le lettere u (*up* 'su'), d (*down* 'giú'), s (*strange* 'strano'), c (*charmed* 'incantato'); gli antiquark – come per lo piú tutte le antiparticelle – si indicano con una sopralineatura: $\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$, $\bar{c}$.

La tabella 3, oltre ai già menzionati Q, J, S e C, contiene altri tre numeri quantici: B, Y, T_3. B, detto «numero barionico», serve a rappresentare una delle leggi fondamentali della natura, come quella della conservazione dell'energia: non si possono creare o distruggere barioni, a meno che insieme non venga creato o distrutto un antibarione. Attribuendo convenzionalmente il numero $B=0$ ai mesoni, 1 ai barioni e -1 agli antibarioni, la legge di conservazione afferma che in ogni processo tra particelle la somma dei valori di B delle particelle che vi prendono parte deve rimanere costante. Leggi analoghe valgono per i numeri quantici Q (conservazione della carica) e J (conservazione del momento angolare). Non si conoscono attualmente eccezioni a queste tre leggi naturali.

Y è chiamato «ipercarica» e T_3 «spin isotopico» o «isospin»; questi non sono però nuovi numeri quantici, ma solo un modo piú simmetrico di rappresentare la carica e la stranezza. Infatti essi sono legati a B, Q e S dalle relazioni

$$Y=B+S \qquad Q=T_3+Y/2.$$

Per rappresentare gli adroni conosciuti fino al 1974 sono sufficienti le varietà u, d, s; il primo adrone con charm, la particella ψ, fu scoperta nel 1974. Tanto per fare degli esempi, le due combinazioni uud e udd dànno luogo a due barioni (perché $B=1/3+1/3+1/3=1$), con cariche $Q=2/3+2/3-1/3=1$ e $Q=2/3-1/3-1/3=0$; una coppia di barioni con queste proprietà è proprio il doppietto nucleonico, *p* e *n*. La particella Δ^0 con massa 1,12 GeV, carica nulla e stranezza -1 corrisponde a una configurazione uds. I due pioni carichi π^+ e π^- corrispondono alle configurazioni $u\bar{d}$ e $\bar{u}d$, mentre il pione neutro π^0 corrisponde alle configurazioni $u\bar{u}$ e $d\bar{d}$.

In tal modo non solo è stato possibile classificare tutte le particelle conosciute (barioni e mesoni), ma anche prevederne di nuove, proprio come il modello atomico di Bohr-Rutherford prevede tutte le specie atomiche conosciute.

10. *Nuovi campi e particelle: il charmonio.*

Il grande successo del modello a quark suggerisce che si tratta di qualcosa di piú profondo che non di un semplice schema di classificazione; ma vi sono anche delle difficoltà. Per esempio, lo spin dei quark corrisponde a dei fermioni; tuttavia esistono barioni con tre varietà identiche di quark, il che contravviene al principio di esclusione. Per superare questa difficoltà alcuni ricercatori suggerirono l'ipotesi che, oltre alle proprietà corrispondenti ai numeri quantici B, J, Q, S e C, ogni varietà di quark ne possieda un'altra che fu chiamata «colore» e può esistere in tre «tinte»: R (*red* 'rosso'), G (*green* 'verde') e B (*blue* 'azzurro');

gli antiquark esistono in tre «anticolori» $\bar{R}$, $\bar{G}$, $\bar{B}$. In tal modo il numero dei quark risulta triplicato, perché ogni varietà esiste in tutti e tre i colori; se, però, si aggiunge la regola che nei barioni che si realizzano in natura devono sempre essere presenti tutti e tre i colori (qualunque sia la varietà con cui è associato un particolare colore), ci si rende conto che il numero delle combinazioni realmente differenti è lo stesso che se il colore non esistesse, cioè non si aggiungono nuove particelle, ma ora è possibile rispettare la condizione che non vi possano mai essere in un barione due quark con gli stessi numeri quantici (colore incluso).

In tal modo il principio di esclusione è rispettato, ma il colore diviene una proprietà inosservabile, perché rispetto ad esso tutti i barioni sono identici (perché contengono tutti e tre i colori), mentre nei mesoni il colore di un quark è annullato dall'anticolore dell'antiquark. La natura è «cieca» ai colori! e allora ci si domanda che cosa può significare il colore di un quark. In realtà la situazione è simile a quella degli atomi, che in condizioni ordinarie sono elettricamente neutri; la carica è osservabile solamente quando gli elettroni escono dall'atomo, pur essendo la carica elettrica la sorgente del campo che li tiene uniti al nucleo. Analogamente, il colore è la sorgente del campo che unisce i quark entro un adrone.

Ma per comprendere come ciò avvenga è necessario rifarsi alla teoria quantistica dei campi, che, come si è visto, associa ogni interazione allo scambio di quanti tra le particelle interagenti: fotoni nel caso del campo elettromagnetico, pioni per la forza di Yukawa. I quanti di un campo trasportano sempre quantità fisse delle varie grandezze fisiche (tranne energia e impulso); per esempio i fotoni possiedono uno spin 1 e quindi trasportano un'unità di spin. Questa proprietà è associata all'invarianza delle equazioni della fisica rispetto a certe operazioni o trasformazioni (delle coordinate o di altre variabili). Le equazioni della meccanica sono invarianti quando si passa da un sistema di riferimento a un altro in moto rettilineo e uniforme rispetto al primo; ciò vale sia per la meccanica classica sia per quella relativistica (trasformazione di Lorentz). La conseguenza di questa invarianza è la conservazione dell'energia e della quantità di moto. Anche le equazioni di Maxwell del campo elettromagnetico sono invarianti per trasformazioni di Lorentz, perciò in tutti i processi elettromagnetici l'energia e la quantità di moto sono conservati.

Il campo elettromagnetico è, però, invariante anche per un altro gruppo di trasformazioni, dette «trasformazioni di gauge»; questo si deve al fatto che le proprietà osservabili del campo, cioè le forze elettrica e magnetica, si possono ricavare dai cosiddetti potenziali, ma non viceversa. Ciò significa che se si conoscono i potenziali si possono calcolare le forze, ma vi sono infiniti potenziali che corrispondono tutti alle stesse forze. Una trasformazione di gauge è una trasformazione dei potenziali che lascia invariato il campo. Questo tipo di invarianza ha come conseguenza che il quanto del campo elettromagnetico, cioè il fotone, non trasporta carica elettrica, ma solo un'unità di spin. L'interazione elettromagnetica non modifica la carica, ma lo spin delle particelle; stati che differiscono solo per l'interazione elettromagnetica possiedono una simmetria binaria,

corrispondente ad aggiungere o togliere un'unità di spin, perciò in un certo atomo tutti gli stati hanno un momento rotazionale risultante intero oppure semintero, ma non alcuni intero e altri semintero.

Ora, quando un neutrone (configurazione udd) si trasforma in protone (uud), uno dei quark d si è trasformato in un quark u; ciò indica che una varietà di quark può trasformarsi in una varietà diversa e che il campo che effettua questa trasformazione è proprio quello che si è chiamato interazione debole. Il quanto dell'interazione debole non è stato finora osservato; si deve ritenere, dato che si hanno trasformazioni con o senza cambiamento della carica elettrica, che esistano (almeno) due quanti: il cosiddetto bosone W, che trasporta carica, e un bosone neutro. Si deve presumere che entrambi abbiano una massa qualche decina di volte maggiore di quella del protone, perché il raggio d'azione dell'interazione debole è molto piccolo; ciò ne rende l'osservazione molto difficile.

Anche l'interazione debole possiede una proprietà di simmetria, che si può illustrare rappresentando le tre varietà di quark u, d, s in un diagramma avente l'isospin T_3 e l'ipercarica Y come ascissa e ordinata (cfr. fig. 5); in questo diagramma i tre quark si dispongono ai vertici di un triangolo e chiaramente una trasformazione d'interazione debole scambia l'uno nell'altro due dei vertici. Per esempio, la disintegrazione β, che trasforma un neutrone (udd) in un protone (uud) equivale a scambiare tra loro i due vertici superiori del triangolo. L'esistenza di tre possibilità di scambio tra i vertici del triangolo è il motivo del carattere ternario della classificazione degli stati adronici, che – scoperto al principio degli anni '60 da Gell-Mann, Ne'eman, Nishijima e altri – suggerí l'ipotesi dei quark. Questa proprietà di simmetria corrisponde, come nel caso del campo elettromagnetico, a un'invarianza del campo (d'interazione debole) per una trasformazione di gauge.

In che senso si può, ora, parlare di conservazione della carica (e di altri numeri quantici)? Evidentemente, uno scambio $u \to d$ o $u \to s$ deve essere accompagnato dall'emissione di un bosone W, che si trasforma immediatamente in una coppia quark-antiquark, cioè in un mesone (carico), in modo che sia rispettata la conservazione della carica e del numero barionico. Questo processo impiega un tempo piú lungo (circa 10^{-10} secondi) di quello ordinario dei processi elettromagnetici (circa 10^{-16} secondi), che a sua volta è molto piú lungo di quello dei processi d'interazione forte (10^{-23} secondi).

Tuttavia la simmetria tra i vertici del triangolo non è perfetta, perché le masse delle tre varietà di quark non sono uguali. Perciò in alcune trasformazioni la stranezza non è conservata; per esempio il mesone $K^+(u\bar{s})$ decade tipicamente in due pioni, $\pi^+(u\bar{d})$ e $\pi^0(u\bar{u})$ o $(d\bar{d})$, entrambi con $S = 0$. L'esistenza di simmetrie «rotte» o «imperfette» è molto importante per la teoria.

Come si vede, vi sono profonde analogie tra l'interazione debole e l'interazione elettromagnetica, avvalorate dal fatto che il fotone e il bosone W dovrebbero trasportare lo stesso spin ($J = 1$). Ciò ha suggerito a Weinberg e Salam nel 1967 la possibilità di unificare i due campi in una sola teoria; questo «campo unificato» possiede tre quanti con proprietà diverse: il fotone, che ha massa nulla, dà luogo al campo elettromagnetico con simmetria perfetta, mentre i due quanti

propri dell'interazione debole, il bosone W e il bosone neutro hanno masse molto elevate e generano simmetrie imperfette. Questa teoria unificata è stata però accettata dalla generalità dei fisici solo vari anni dopo, quando si riuscí a superare una grave difficoltà, connessa con la cosiddetta «rinormalizzazione» delle costanti.

La forza elettrostatica, come è stato detto piú volte, aumenta man mano che ci si avvicina alla carica che è la sorgente del campo. Fino a che distanza è ragionevole supporre che seguiti questo aumento? se continuasse fino al punto occupato dalla sorgente, la forza diventerebbe infinitamente grande e ciò condurrebbe ad associare alla carica un'energia (di origine elettromagnetica) e quindi una

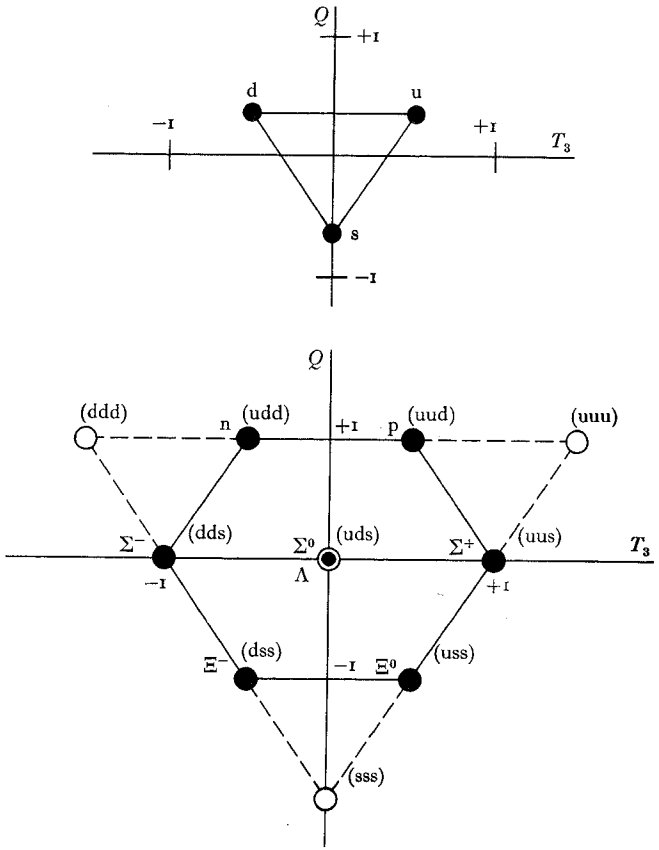


Figura 5.

Schema isospin-ipercarica per i quark (triangolo); l'esagono corrisponde all'ottetto barionico fondamentale. Si noti che la configurazione uds corrisponde a due particelle (Σ^0 e Λ).

massa infinita. Nella fisica classica questo tipo di difficoltà viene ignorato, ma nella teoria quantistica dei campi ciò non è possibile, perché l'interazione tra la particella carica e il fotone avviene quando essi occupano la stessa posizione. Il modo di superare questa difficoltà nel caso del campo elettromagnetico è stato scoperto ancora verso la fine degli anni '40 da Feynman, Schwinger, Bethe, Tomonaga e altri e si basa sulla cosiddetta «polarizzazione del vuoto»: una carica elettrica tende a creare nel vuoto intorno a sé una distribuzione di cariche di segno opposto, le quali schermano la sua azione sulle cariche piú lontane. Perciò la carica negativa di un elettrone potrebbe anche essere grandissima (infinita), ma polarizzando il vuoto intorno a sé crea una distribuzione di cariche positive; il processo di «rinormalizzazione» consiste nell'aggiustare questa distribuzione in modo che a grande distanza dal centro (dove si trova la carica) la somma delle cariche negative e positive e delle energie corrispondenti diano precisamente la carica e la massa dell'elettrone, anche se la distribuzione delle cariche positive e negative prese separatamente darebbero valori infiniti.

Con questa tecnica di rinormalizzazione è stato possibile calcolare alcune grandezze con una precisione sbalorditiva; per esempio, il valore teorico del momento magnetico dell'elettrone cosí calcolato è 1,001 159 652 375 volte l'unità naturale di momento magnetico, $\hbar e/2mc$ (magnetone di Bohr), mentre il valore sperimentale piú attendibile è 1,001 159 652 390, con una differenza di sole quindici unità nella dodicesima cifra decimale! Ciò può dare un'idea dell'altissimo grado di attendibilità raggiunto dall'elettrodinamica quantistica.

Quando, però, si vuole applicare questa tecnica ad altri campi, si possono incontrare serie difficoltà. Per esempio, se si tenta di applicare la teoria quantistica dei campi al campo gravitazionale, si trova che il quanto corrispondente («gravitone») deve avere massa propria nulla e spin 2, ma disgraziatamente non è possibile rinormalizzare il campo gravitazionale; ciò è da ricollegare alla circostanza che il gravitone trasporta energia, cioè massa, ossia la grandezza che genera il campo, a differenza dei fotoni che non trasportano cariche elettriche. Tuttavia qualche anno fa è stato dimostrato che il campo unificato è rinormalizzabile e questa possibilità è associata alla «rottura» della simmetria di gauge, per cui il bosone W e il bosone neutro acquistano la loro massa (meccanismo di Higgs).

Nel quadro generale della teoria quantistica dei campi, anche l'interazione che unisce i quark in un adrone si deve allo scambio di uno o piú quanti. La grandezza scambiata non può essere però né l'ipercarica, né l'isospin, perché lo scambio di questi nell'interazione debole lascia praticamente invariata la massa. Perciò si assume che la grandezza che si scambia sia il colore, che è anche la grandezza che genera il campo. I quanti che effettuano questo scambio sono stati chiamati «gluoni» (*glue* 'colla'); il campo ha ricevuto il nome di «campo cromodinamico» e si assume che i gluoni abbiano massa nulla e spin 1. Con ciò il campo cromodinamico risulta completamente determinato; incidentalmente, il campo cromodinamico deve essere considerato la «vera» interazione forte: l'interazione tra nucleoni che li tiene uniti nel nucleo sta al campo cromodinamico come le forze di Van der Waals tra atomi neutri stanno alle forze elettrostatiche ordinarie. La teoria del campo cromodinamico spiega anche perché i colori dei quark in

un barione debbano essere tutti diversi; questa è infatti la condizione perché la forza sia attrattiva e quindi dia luogo a una configurazione stabile. Occorrono otto tipi di gluoni per effettuare tutti gli scambi necessari.

La simmetria di gauge del campo cromodinamico è perfetta, perché si è assunto che la massa dei gluoni sia nulla; il campo si può perciò rinormalizzare. Ma il fatto che i gluoni trasportano colore, cioè la grandezza che genera il campo, produce un effetto «antischermante»; in altre parole la forza tra i quark cresce al crescere della distanza, invece di diminuire (almeno fino a una distanza di taglio), come la forza tra gli estremi di una stringa elastica quando questa è stirata. Perciò a piccolissime distanze dal centro di un adrone i quark si comportano come particelle libere, mentre a distanze un poco maggiori sono legati sempre piú rigidamente. Un adrone è stato anche paragonato a un recipiente o a una borsa, nel cui interno i quark possono muoversi liberamente, ma tendono a fissarsi sulle pareti.

Ciò può fornire una spiegazione del fatto che i quark non sono stati mai isolati; per far uscire un quark dalla borsa bisognerebbe concentrare su di esso una quantità di energia cosí grande, che il risultato sarebbe quello di formare una coppia quark-antiquark, cioè un mesone. Cosí, se si vuole rompere un adrone per isolare un quark, accade come quando si spezza in due un magnete nella speranza di isolare un polo magnetico: i due poli non si separano, ma si formano due magneti, ciascuno con i suoi poli.

Finora per spiegare le proprietà degli adroni sono state impiegate solo tre varietà di quark, u, d, s; perché un quarto quark, il charm? Un argomento potrebbe essere l'analogia tra leptoni e quark, che si considerano le due famiglie di «vere» particelle elementari; la differenza principale è che i leptoni sono «neutri» al colore, cioè sono insensibili al campo cromodinamico. Ora alcuni anni fa si credeva che i leptoni fossero quattro: l'elettrone, il muone e i due neutrini; quindi dovevano essere quattro anche i quark. (Questo ragionamento ricorda un poco quello degli scolastici per sostenere che i pianeti dovevano essere sette, ma nella fisica moderna non sarebbe la prima volta che simili argomenti hanno condotto a scoperte brillanti!)

Un argomento piú importante si deve a Glashow, Iliopoulos e Maiani: nelle trasformazioni d'interazione debole quasi sempre carica elettrica e stranezza cambiano insieme; ciò vuol dire che una trasformazione $s \to u$ è piú probabile di una trasformazione $s \to d$. Ciò viola il principio della simmetria della carica nell'interazione debole. Ora sarebbe difficile spiegare in maniera intuitiva perché ciò accada, ma il calcolo mostra che una nuova particella (non necessariamente un quark) può rendere fino a mille volte meno intense le correnti neutre con cambiamento di stranezza; l'ipotesi piú plausibile è che questa nuova particella sia proprio il charm.

La prova decisiva si ebbe, però, nel 1974, quando due gruppi di ricercatori operanti nel Brookhaven National Laboratory e nella università di Stanford annunziarono la scoperta di una nuova particella, un mesone di massa 3,095 GeV, che fu chiamata J dal primo gruppo e ψ dal secondo. Un terzo gruppo operante presso i Laboratori nazionali di Frascati, pur non partecipando alla scoperta,

ebbe una parte molto importante nel riconoscere immediatamente le proprietà della nuova particella. Il fatto importante era la vita media relativamente lunga, 10^{-20} secondi, per una particella di massa cosí elevata; la spiegazione di questa relativa stabilità è che il decadimento della particella ψ corrisponde a una trasformazione di interazione debole, in cui è implicato un nuovo numero quantico: il charm. Da questo momento incominciò una vera caccia alle particelle con charm.

La particella ψ è uno stato della configurazione $c\bar{c}$; perciò è stata paragonata al cosiddetto «positronio», una struttura instabile formata da un positrone e da un elettrone orbitanti intorno al comune centro di gravità; naturalmente nel caso del positronio la forza che lega le due particelle è il campo elettrico, mentre nella configurazione $c\bar{c}$, che fu chiamata «charmonio», è il campo cromodinamico. L'interesse del charmonio sta nella possibilità di studiare le proprietà del campo cromodinamico. Un altro stato di charmonio fu scoperto quasi subito dopo la scoperta della particella ψ; si tratta di una particella di massa 3,684 GeV, che fu chiamata ψ' ed è un prodotto dell'annichilazione di una coppia elettrone-positrone, tramite un fotone intermedio.

In una configurazione $c\bar{c}$ ci si devono aspettare stati con spin paralleli (tripletti, spin risultante 1), che per analogia con gli stati dell'atomo di He sono chiamati «ortocharmonio», e stati con spin antiparalleli (singoletti, spin risultante 0), chiamati «paracharmonio». Quasi certamente ψ e ψ' sono lo stato fondamentale e il primo stato eccitato dell'ortocharmonio con spin orbitale zero (nella spettroscopia atomica questi stati sarebbero indicati con S); quindi, pur appartenendo a una serie di tripletti sono stati semplici. Altri stati dell'ortocharmonio con momento orbitale uguale a 1 (stati P) e anche stati del paracharmonio sono stati scoperti successivamente. Le transizioni tra i vari stati del charmonio sono di tipo elettromagnetico e quindi avvengono per emissione di fotoni; sta sorgendo in tal modo una «spettroscopia del charmonio».

Altri stati mesonici con charm sono stati scoperti a un'energia che è poco piú della metà di quella della particella ψ; si tratta degli stati fondamentali e dei due primi stati eccitati delle configurazioni $u\bar{c}$ e $\bar{d}c$.

A questo punto vien fatto di chiedersi perché il numero dei quark debba essere limitato a quattro. La scoperta del leptone τ e del neutrino associato suggerisce per analogia sei quark, ma esiste anche una certa evidenza sperimentale che il numero delle varietà di quark sia superiore a quattro. In effetti un gruppo di ricercatori dell'università dello stato di New York (Stonybrook), della Columbia University e del Laboratorio Fermi ha scoperto nel 1977 un gruppo di particelle con massa superiore a 9 GeV (famiglia Y) che secondo l'interpretazione corrente sono costituiti da un quark piú pesante del charm e dal suo antiquark.

11. *Conclusione e sguardo retrospettivo.*

A questo punto termina la storia affascinante dell'idea di materia. Nel tracciare questa storia si è cercato di seguire l'ordine cronologico dello sviluppo delle idee, ma dalla metà circa del secolo scorso ciò non è stato piú possibile; man

mano che si approfondivano le ricerche sulla struttura della materia, diveniva necessario introdurre concetti fisici nuovi come quelli di energia e di campo, di causalità, ecc. e quindi seguire un numero sempre maggiore di sviluppi paralleli. Nello stesso tempo, il concetto di materia si è fatto sempre meno definito; all'ultimo è divenuto sempre piú difficile parlare di 'materia' e sotto molti aspetti questo termine è stato sostituito dal termine 'particella', ma forse sarebbe piú opportuno usare un termine ancora piú vago come 'entità', che in effetti è stato impiegato qualche volta negli ultimi paragrafi (a proposito dei quark). A questo livello parlare di materia e di energia come di cose differenti diviene impossibile. Anche la nozione di campo è solo un certo modo di guardare ai fenomeni; invero i campi stessi sembrano manifestarsi mediante l'intervento dei rispettivi quanti, cioè ancora di particelle. Cosí i concetti fondamentali della fisica, materia, energia, campi, si fondono e svaniscono l'uno nell'altro.

Ma anche l'altro concetto, che da Democrito in poi sembrava in qualche modo formare una coppia filosofica con quello di particella-materia, quello di «vuoto», non appare piú come una contrapposizione. Non solo nella nozione di campo è contenuta la necessità di attribuire allo spazio vuoto delle proprietà sperimentalmente differenzianti e quindi osservabili, ma la stessa nozione di particella fa ricorso alla proprietà del vuoto di «polarizzarsi», divenendo cosí portatore di grandezze fisiche, come una distribuzione di cariche elettriche o di quella proprietà dei quark che viene chiamata colore.

In questa trattazione non è stato sottolineato abbastanza il concetto di «simmetria» – che tuttavia domina la fisica teorica moderna – considerandolo estremamente tecnico e troppo difficile per una esposizione che non fa uso di sviluppi matematici. Le leggi fondamentali di conservazione delle grandezze meccaniche, energia e quantità di moto, del numero barionico, del numero leptonico, della carica elettrica, dello spin, sono una conseguenza di questa generale simmetria della natura, descritta dall'invarianza delle equazioni della fisica.

Per questo motivo i cosmologi provano un certo imbarazzo di fronte a una particolare manifestazione di disimmetria (almeno apparente) del mondo in cui viviamo. Perché gli atomi della materia che ci circonda sono formati da barioni – in particolare protoni e neutroni – e da leptoni e non da antibarioni e antileptoni? In verità, se una lontana galassia fosse formata da «antimateria» non ci sarebbe alcuna possibilità di accorgersene, perché gli spettri dell'anti-idrogeno, dell'anti-calcio e dell'anti-ferro sono assolutamente identici agli spettri dell'idrogeno, del calcio e del ferro. D'altra parte collisioni di galassie e anti-galassie dovrebbero produrre una grande quantità di fotoni a circa 0,5 MeV, che non sono mai stati osservati. Perciò sembra proprio che il buon Dio nel creare il mondo abbia avuto le sue ragioni per preferire i quark agli antiquark. Oppure esiste una legge nascosta della fisica, una disimmetria profonda, che ancora ci sfugge.

Comunque, nel guardare retrospettivamente allo sviluppo delle idee sulla materia, dai primi filosofi ionici alla fisica del charmonio, la cosa che piú di ogni altra colpisce è che man mano che si approfondiva l'esplorazione della natura – dalla realtà quotidiana al mondo atomico, a quello nucleare, a quello delle par-

ticelle – si sono scoperte situazioni sempre nuove e imprevedibili, che non solo hanno fatto aumentare le nostre conoscenze, ma hanno creato dei nuovi modi di conoscere. Naturalmente il caso piú clamoroso è quello che ha dato luogo al «principio di indeterminazione». Secondo il modo di vedere ordinario (classico) il principio di indeterminazione limita le nostre conoscenze di un sistema fisico – e cosí è stato presentato anche in queste pagine. In realtà non esiste alcuna limitazione, perché non esistono altre informazioni, oltre quelle compatibili con il principio d'indeterminazione; il supporre che possano esistere non è che abito mentale acquisito da esperimenti ad altri livelli della realtà.

Ma questo è solo un aspetto della questione. Un quark, un protone o un elettrone non sono conosciuti nello stesso modo – cioè attraverso gli stessi processi sensorio-mentali – con cui si conoscono gli oggetti del mondo ordinario. Anche da questo punto di vista, il procedere verso livelli sempre piú profondi corrisponde a una modificazione sempre piú profonda del modo con cui sono ottenute le nostre informazioni sulle cose. È possibile ancora «osservare» gli elettroni, i protoni e alcune altre particelle; se ne fotografano le tracce nelle camere a nebbia o nelle camere a bolle. Ma le altre particelle, con vite medie brevissime, non lasciano tracce; la loro esistenza si deduce dalle tracce di altre particelle, oppure appaiono come «picchi di risonanza» nelle curve che rappresentano la variazione della frequenza dei processi in funzione dell'energia delle particelle che collidono negli esperimenti di alta energia. Per i quark non c'è neppure questa possibilità; se ben si considera un quark è un puro costrutto mentale inventato per rappresentare certe proprietà di simmetria delle particelle.

La conclusione sarebbe che alla base della struttura della materia esistono unicamente costrutti mentali! Ma questo tipo di considerazioni esulano completamente da quelle che ci si è proposte e alle quali ci si vuole attenere. [L. G.].

Cassirer, E.
1937 *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik; historische und systematische Studien zum Kausalproblem*, Elanders boktryckeri aktiebolag, Göteborg (trad. it. La Nuova Italia, Firenze 1970).

Copleston, F. Ch.
1946 *A History of Philosophy*, The Newman Press, Westminster Md.; ed. Doubleday, New York 1962.

Diels, H., e Kranz, W.
1951 (a cura di) *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Weidmann, Berlin 1951[6] (trad. it. Laterza, Bari 1969).

Galilei, G.
1623 *Il Saggiatore*, Mascardi, Roma; ed. Einaudi, Torino 1977.
1638 *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Elzevier, Leiden; ed. Boringhieri, Torino 1958.

Geymonat, L.
1970-72 *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, 6 voll., Garzanti, Milano.

Hall, A. R.
1978 *Introduction to Symposium 5: Physics and Metaphysics in the Scientific Revolution*, in E. G. Forbes (a cura di), *Proceedings of the XV International Meeting on the History of Science*, University of Edinburgh Press, Edinburgh - The Scholar Press, Ilkley, pp. 253-55.

Heisenberg, W.
1959 *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science*, Allen and Unwin, London (trad. it. Il Saggiatore, Milano 1963[2]).
1966 *Introduction to the Unified Field Theory of Elementary Particles*, Interscience, London - New York.

Kuhn, Th. S.
1957 *The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, Harvard University Press, Cambridge Mass. (trad. it. Einaudi, Torino 1975[2]).

Laplace, P.-S. de
1814 *Essai philosophique sur les probabilités*, in *Théorie analytique des probabilités*, Courcier, Paris 1814[3] (trad. it. in *Opere*, Utet, Torino 1967, pp. 241-404).

Lavoisier, A.-L.
1789 *Discours préliminaire*, in *Traité élémentaire de Chimie*, Cuchet, Paris; ed. Deterville, Paris 1801[3].

Micheli, G.
1970 *Il declinare dello spirito scientifico*, in Geymonat 1970-72, I, pp. 344-51.

Newton, I.
1704 *Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, Smith and Walford, London (trad. it. in *Scritti di ottica*, Utet, Torino 1979).

Continuo/discreto è una delle **coppie filosofiche** soggiacenti alla teoria della materia (cfr. **fisica**). La filosofia greca (cfr. **filosofia/filosofie**) sfrutterà tale opposizione (cfr. **opposizione/contraddizione**), cosí come cercherà di stabilire una **mediazione** fra i due termini. Presso gli atomisti la coppia si arricchirà di altre determinazioni e di nuove difficoltà (cfr. **atomo e molecola**, **vuoto**) e con l'aristotelismo essa si legherà alla causalità (cfr. **causa/effetto**); da parte sua il pneuma stoico presenterà qualche affinità con la nozione di **energia**. Il modello atomista della materia, ritornato in auge a partire dal secolo XVII, sarà elaborato in modo diverso a seconda delle discipline (cfr. **disciplina/discipline**), in particolare nei secoli XIX e XX, da solo o associato al modello ondulatorio (cfr. **luce**, **quanti**, **particella**, **interazione**, **simmetria**); la relatività ha poi stabilito un legame fra lo **spazio/tempo** e la materia (cfr. **gravitazione**, **cosmologie**). Ciò nonostante la **struttura** ultima dell'**organizzazione** delle particelle, oggetto di un intenso lavoro di ricerca, non è stata ancora chiarita.

Spazio-tempo

Lo scopo del seguente articolo è di esporre i risultati piú recenti ottenuti dall'analisi della struttura dello spazio-tempo, a partire da lunghezze caratteristiche di $\sim 10^{-13}$ cm (raggio del protone), che definiscono la scala microscopica, fino a lunghezze dell'ordine di $\sim 10^{28}$ cm (raggio dell'universo visibile) che definiscono la scala cosmologica.

La teoria piú esauriente e soddisfacente dello spazio-tempo in tale intervallo di distanze è la relatività generale. Probabilmente il risultato piú interessante di tali ricerche, basato su di un'analisi matematica rigorosa dei concetti di spazio, tempo e causalità nell'ambito della relatività generale, è la predizione dell'esistenza di «singolarità» nello spazio-tempo. Cioè, la relatività generale contiene in se stessa le sue limitazioni intrinseche con la previsione delle «singolarità»: eventi ai quali non possono applicarsi i concetti abituali di spazio e di tempo. Nell'ambito della relatività generale tali singolarità possono formarsi nello stadio finale del collasso gravitazionale di una stella massiccia o nell'esplosione primordiale che ha dato origine al nostro universo. I teoremi che affermano l'esistenza di singolarità sotto condizioni fisiche molto generali e ragionevoli sono dovuti essenzialmente a Steve Hawking dell'università di Cambridge, a Roger Penrose dell'università di Oxford e a Robert Geroch dell'università di Chicago. Tali teoremi sono probabilmente il contributo piú significativo alla concezione dello spazio-tempo dopo la teoria di Einstein.

Una formulazione (anche se necessariamente intuitiva) dei teoremi di singolarità presuppone una descrizione dello spazio-tempo a un elevato livello di astrazione. Buona parte di questo articolo sarà quindi dedicata all'esposizione dei concetti matematici essenziali ad una descrizione dello spazio-tempo; solo alla fine verrà trattato il problema delle singolarità. Nel § 1 ci si occuperà della descrizione continua dello spazio-tempo e della sua validità. Nel § 2 verranno trattate le strutture attribuite allo spazio-tempo affinché la formulazione delle leggi fisiche sia possibile: esse sono, in ordine di complessità, quella topologica, quella affine, e quella riemanniana; un posto a parte occupa poi la struttura causale. La struttura riemanniana distingue lo spazio-tempo di Newton da quello della relatività generale. Le diverse strutture causali poi differenziano nettamente la fisica newtoniana da quella relativistica (speciale e generale). Si darà in seguito (§ 3) un'opportuna definizione dei punti singolari dello spazio-tempo e si commenteranno brevemente i teoremi di singolarità di Penrose, Hawking e Geroch.

1. *Descrizione continua dello spazio-tempo e sua validità.*

Una delle ipotesi fondamentali comuni a tutte le teorie fisiche universalmente accettate è la seguente: «Lo spazio-tempo (definito come l'insieme di tutti gli eventi) è una varietà differenziabile di dimensione 4, di Hausdorff, connessa,

munita di una connessione affine». Siccome la parte matematica di tale assioma è ampiamente illustrata nei §§ 5-6 dell'articolo «Relatività» in questa stessa *Enciclopedia* (al quale si farà costante riferimento), ci si limita qui a un'analisi operativa di esso.

Tale assioma è perfettamente giustificato al livello dei corpi macroscopici, nella misura in cui questi possono essere considerati infinitamente divisibili. Per vedere ciò in maggior dettaglio si farà riferimento alla penetrante analisi di Synge [1965]. Si supponga di avere a disposizione un gran numero di orologi ciascuno dei quali segni un proprio tempo. Non è necessario supporre che gli orologi siano sincronizzati, né che ciascun orologio mantenga un ritmo costante di marcia. Si richiede solamente che il tempo di ciascun orologio sia un insieme di numeri reali crescenti, cioè che il tempo non si ripieghi e torni su se stesso. Inoltre si richiede che gli orologi siano impenetrabili, cioè che due orologi non occupino mai lo stesso luogo. Bisogna perciò supporre che tutti gli orologi siano distinguibili e ammettere inoltre che ciascun orologio sia individuato univocamente da una terna di numeri reali (a, b, c). Quest'ultima assunzione traduce il fatto empirico della quadridimensionalità dello spazio-tempo. A questo livello essa viene adottata come un dato di esperienza. Vi sono però delle teorie che cercano di ricavare questo dato da considerazioni piú profonde di carattere fisico-geometrico.

In tal modo è possibile costruire un sistema di coordinate in una regione dello spazio-tempo, associando univocamente a ciascun evento E quattro numeri reali $(a, b, c; t)$ dove (a, b, c) sono i tre numeri reali che individuano l'orologio posto nel luogo dell'evento e t è il tempo indicato dall'orologio in concomitanza all'accadere dell'evento E. Si consideri ad esempio l'evento costituito dal passaggio di un'auto su di una striscia pedonale. A tale evento è possibile associare tre numeri reali necessari per identificare l'orologio (ad esempio le sue coordinate cartesiane rispetto al riferimento formato dallo spigolo di una casa vicina) e come quarto numero il tempo segnato dall'orologio al passaggio dell'auto. È ovvio che per far ciò è necessario che gli orologi a disposizione siano in numero grandissimo (al limite infinito) e che la loro distribuzione sia molto fitta (al limite continua). Inoltre non vi è alcuna garanzia che il particolare sistema di coordinate cosí costruito ricopra la totalità degli eventi. In tal modo viene costruita una collezione di carte locali su tutto lo spazio-tempo. Due diversi sistemi di coordinate costruiti nel modo precedente e che ricoprano la stessa regione di spazio-tempo sono necessariamente in corrispondenza biunivoca e continua (la differenziabilità di tale corrispondenza è un requisito di carattere tecnico che può sempre essere imposto senza perdita di generalità).

Si cercherà ora di saggiare la validità delle precedenti considerazioni a livello microscopico. Si è visto che l'esistenza di un gran numero di orologi distinguibili, impenetrabili (e perciò perfettamente localizzabili) e tali che ciascuno di essi generi una successione monotona continua di numeri reali (tempi) è alla base di una definizione operativa di «varietà differenziabile». A livello microscopico, però, non si possono usare degli orologi macroscopici, composti di molti atomi. Perciò si è costretti ad usare come orologi gli atomi stessi. Ciò è reso legittimo dalla meccanica quantistica: essa insegna che, nei processi di assorbimento e di

emissione della radiazione, un atomo si comporta come un oscillatore armonico che vibra con la stessa frequenza della radiazione (cfr. l'articolo «Misura» in questa stessa *Enciclopedia*). Perciò il ritmo di vibrazione di un atomo può essere preso come lancetta che scandisce il tempo proprio dell'atomo. Le stesse considerazioni possono applicarsi alle particelle elementari, che sono i costituenti ultimi della materia, poiché ad ogni particella di massa m è associata in modo naturale la frequenza caratteristica mc^2/h dove h è la costante di Planck. Sembrerebbe perciò di avere risolto il problema della scelta degli orologi a livello microscopico, in quanto gli atomi sono con ottima approssimazione anche degli orologi accurati, essendo il loro ritmo di marcia sensibilmente costante. La meccanica quantistica porta però a due notevoli difficoltà:

1) Per il principio d'indeterminazione, una localizzazione precisa dell'atomo in un certo istante porta a una grande imprecisione nella sua posizione in un istante successivo. Perciò sembra impossibile assegnare operativamente le quattro coordinate spazio-temporali a un evento.

2) Per poter costruire un sistema di coordinate gli orologi devono essere perfettamente distinguibili e individuabili. Ora è sperimentalmente ben provato che atomi dello stesso tipo (ad esempio idrogeno) o particelle elementari della stessa classe (ad esempio protoni) sono indistinguibili. Perciò non è possibile assegnare agli atomi delle etichette che ne marchino la posizione e ne individuino il tempo segnato. Nel caso delle particelle elementari si aggiunge un'altra difficoltà concettuale. Infatti, per localizzare con precisione una particella elementare occorre «spararle» contro un'altra particella elementare e osservarne la deviazione. Ora, se la particella elementare è veramente puntiforme (come sembra lo siano gli elettroni) alla particella incidente occorre una grande energia per passarle vicino e se questa energia è abbastanza grande possono essere create altre particelle elementari che renderebbero confuso il bersaglio. Ne segue quindi che è sperimentalmente impossibile localizzare un particella elementare con una precisione maggiore di 10^{-15} cm [cfr. Hawking e Ellis 1973].

Dal punto di vista della filosofia operazionistica non sembra quindi giustificabile l'attribuzione allo spazio-tempo di una struttura continua (varietà differenziabile), almeno a livello microscopico. Il punto di vista operazionistico non è però l'unico adottato nella costruzione di una teoria fisica. Se non si postula una tale stretta rispondenza tra concetti fisico-matematici e definizione operativa, abbandonando quindi il postulato operazionistico, si vede che la struttura continua attribuita allo spazio-tempo è addirittura richiesta dall'interpretazione dei dati sperimentali, almeno per distanze $\gtrsim 10^{-14}$ cm. Ciò risulta evidente dall'accuratezza con cui viene verificata l'invarianza delle interazioni tra particelle elementari sotto il gruppo delle trasformazioni di Lorentz. Il gruppo di Lorentz è un gruppo continuo di trasformazioni che agisce sullo spazio-tempo (di Minkowski) della relatività speciale. Si può dimostrare che postulare l'invarianza sotto tale gruppo equivale perfettamente a richiedere la struttura di varietà differenziabile per lo spazio-tempo. Ora, l'invarianza per il gruppo di Lorentz è verificata con altissima precisione per gli urti che avvengono tra le particelle elementari negli acceleratori di particelle, fino ad energie abbastanza elevate che corrispondono

a distanze di avvicinamento $\gtrsim 10^{-14}$ cm. Ne segue che la struttura continua dello spazio-tempo può ritenersi fondata fino a tali distanze.

È possibile però che per distanze inferiori a 10^{-14} cm l'attribuire una struttura continua allo spazio-tempo possa portare a notevoli errori. Perciò diversi autori hanno studiato dei modelli in cui allo spazio-tempo viene attribuita una struttura discreto-reticolare, dalla quale passare a quella continua con considerazioni statistiche. Uno dei tentativi recenti tra i piú interessanti è dovuto a Penrose. Questi assume come fondamentali le leggi della meccanica quantistica (non relativistica) per i momenti angolari (spin). Tali regole sono di carattere discreto e in ultima analisi, secondo Penrose, potrebbero essere dedotte da una formulazione completamente combinatoria della meccanica quantistica. Quindi Penrose postula come modello dello spazio-tempo un reticolo di spin che obbediscono alle regole della meccanica quantistica. Poi, con considerazioni probabilistico-statistiche, definisce le direzioni e gli angoli. Proseguendo in tal modo, Penrose riesce a ricostruire la struttura dello spazio euclideo tridimensionale. Tale approccio è manifestamente non-relativistico e quindi non può condurre allo spazio-tempo della relatività generale. La difficoltà principale di questo tentativo sta nell'incorporare gli effetti della relatività speciale, cioè il gruppo di Lorentz. A tale scopo Penrose e la sua scuola stanno sviluppando, presso l'università di Oxford, il calcolo dei *twistors*, un modo radicalmente nuovo di affrontare il problema della struttura dello spazio-tempo.

2. *Le strutture dello spazio-tempo.*

2.1. Significato fisico della connessione affine.

La motivazione principale per l'introduzione di una connessione affine risiede nella possibilità di definire delle curve privilegiate passanti per ogni punto dello spazio-tempo e per ogni direzione prefissata. Tali curve sono le linee autoparallele o geodetiche che generalizzano a una varietà curva il concetto di linea retta. L'equazione che definisce tali curve è un'equazione differenziale ordinaria del second'ordine e perciò ne segue che una geodetica è determinata univocamente (almeno in una piccola regione dello spazio-tempo) da un punto iniziale e da una direzione iniziale. L'esistenza di una classe di curve privilegiate (le geodetiche), definite in ogni punto una volta assegnata una direzione, corrisponde, nel linguaggio fisico, a una classe di moti privilegiati nello spazio-tempo. Cioè, fissati un evento E e una direzione $\mathbf{T}$, è univocamente definito il moto geodetico passante per E e avente $\mathbf{T}$ come vettore tangente in E.

Si vedrà ora come l'esistenza di moti privilegiati permetta di formulare rigorosamente il principio d'inerzia. Per costruire una dinamica occorre distinguere due classi di moti: 1) i moti «naturali», che non richiedono spiegazioni (ad esempio il moto rettilineo uniforme della meccanica newtoniana); 2) i moti che deviano dai moti «naturali» e che quindi devono essere spiegati in termini di «forze». Allora è spontaneo prendere per moti «naturali» i moti geodetici. In tal caso le forze vengono definite come la causa della deviazione dal moto geodetico.

La struttura delineata è alla base delle varie teorie dinamiche, come si vedrà meglio in seguito. Ad esempio, nel caso della fisica galileiana (in assenza di gravitazione) e della relatività ristretta, i moti «naturali» sono quelli rettilinei e uniformi e perciò le geodetiche dello spazio-tempo sono delle linee rette e la connessione è piatta. Invece, nel caso della fisica newtoniana (comprendente la gravitazione) e della relatività generale, i moti «naturali» sono quelli in caduta libera nel campo gravitazionale. Perciò le geodetiche non sono delle rette nello spazio-tempo e quindi esse definiscono una connessione curva. La curvatura della connessione descrive allora il campo gravitazionale.

È sottinteso che quando si parla di moti «naturali» ci si riferisce a moti eseguiti da particelle di prova senza struttura, che hanno carattere necessariamente ideale. Si suppone perciò di avere a disposizione delle particelle puntiformi, dotate di massa (inerzia) ma non di carica elettrica, momento magnetico, ecc., e quindi schermate da qualsiasi interazione ad eccezione eventualmente di quella gravitazionale.

2.2. La struttura causale.

Come si vedrà, la differenza sostanziale tra le teorie non-relativistiche e quelle relativistiche sta nella struttura causale. Essenzialmente una struttura causale consiste nel definire: 1) le curve «causali» che connettono eventi in relazione causale; 2) il futuro $I^+(S)$ e il passato $I^-(S)$ causali di un insieme S di eventi. Si esaminerà in seguito in dettaglio la struttura causale nei casi dello spazio-tempo della meccanica non-relativistica, della relatività speciale e dello spazio-tempo pseudoriemanniano della relatività generale.

2.3. Lo spazio-tempo della meccanica newtoniana.

Per lo spazio-tempo V si assume una struttura di varietà differenziabile dotata di connessione affine. Come si vedrà in seguito, la connessione affine sarà determinata dalle particolari forme che la legge d'inerzia assume in meccanica classica, a seconda che s'includa o no il campo gravitazionale.

Un postulato caratteristico della meccanica non-relativistica è l'esistenza di un tempo assoluto t, indipendente dall'osservatore e che dà un criterio assoluto per la simultaneità tra eventi. Matematicamente t viene definito come un'applicazione $t: V \to \mathbf{R}$ di V sulla retta reale $\mathbf{R}$, definita a meno di una trasformazione lineare, $t' = at + b$, $a > 0$. Perciò t associa a ogni evento $p \in V$ un numero reale $t(p)$ che corrisponde fisicamente al tempo letto su di un orologio (standard) posto in p. La trasformazione $t' = at + b$ corrisponde a un cambiamento dell'unità di misura che preserva il senso del tempo ($a > 0$) e a una ridefinizione dell'origine dei tempi (b). Si assume inoltre che il gradiente di t non si annulli mai, di modo che il tempo t cresca sempre lungo qualsiasi curva che rappresenti la traiettoria di un osservatore.

Mediante l'applicazione t è possibile definire la relazione di simultaneità fra

due eventi $p, q \in V$, cioè p è simultaneo con q se e solo se $t(p) = t(q)$. È ovvio quindi che tale relazione di simultaneità è del tutto indipendente dall'osservatore. Essa perciò definisce in modo naturale un ordinamento assoluto degli eventi: p precede q se e solo se $t(p) < t(q)$. Inoltre si vede facilmente che la relazione di simultaneità è una relazione di equivalenza per cui in V si ha una partizione in classi di equivalenza di eventi simultanei (cfr. fig. 1).

S^1 è la ipersuperficie di V (sottovarietà tridimensionale) contenente tutti e soli gli eventi che accadono al tempo t^1; similmente S^2 al tempo t^2, ecc. V si può allora pensare come unione di tutte queste ipersuperfici che sono a due a due disgiunte. Tecnicamente si dice che V ammette una stratificazione. Le ipersuperfici S^1, S^2, ecc. si dicono sezioni spaziali. Mediante questa stratificazione si definisce la struttura causale dello spazio-tempo della meccanica classica. Si indichi con S^p la sezione spaziale contenente l'evento p. Si ha $V = \bigcup_{p \in V} S^p$ e $S^p \cap S^q = \emptyset$ se $p \neq q$. S^p è l'insieme degli eventi simultanei con p. S^p separa il futuro causale di p dal passato causale di p. Infatti, si definisce futuro causale di p, $I^+(p)$, l'insieme dei punti che possono essere raggiunti da p mediante curve «causali» orientate verso il futuro. Un'analoga definizione (speculare) si applica al passato causale di p, $I^-(p)$. Occorre ancora definire cosa s'intende per curva causale orientata verso il futuro (rispettivamente verso il passato). Se si prendono due eventi E, E' con $E(x^a, t)$, $E'(x'^a, t')$, il vettore $EE'(x'^a - x^a, t' - t)$ si dirà orientato verso il futuro se $t' - t > 0$ (rispettivamente verso il passato se $t' - t < 0$). È possibile allora definire una curva causale orientata verso il futuro come una curva tale che il suo vettore tangente sia in ogni punto orientato verso il futuro. Similmente per una curva causale orientata verso il passato. Si supponga ora di prendere p come origine, cioè con un'opportuna trasformazione di coordinate, di porre $p(0, 0, 0, 0)$. Allora è immediato che $I^+(p) = \{(x^a, t), t > 0\}$ e $I^-(p) = \{(x^a, t), t < 0\}$. Perciò si ha che $S^p = \{(x^a, t), t = 0\}$, cioè l'insieme degli eventi simultanei con p, è la frontiera comune a $I^-(p)$ e $I^+(p)$. Questo è un carattere distintivo dello spazio-tempo non-relativistico che traduce in linguaggio topo-

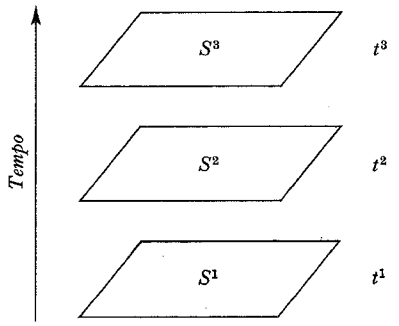


Figura 1.

Stratificazione dello spazio-tempo V con sezioni spaziali S^1, S^2, S^3, corrispondenti ai tempi $t^1 < t^2 < t^3$.

logico la non-esistenza di una velocità limite per la trasmissione dei segnali. Un altro postulato caratteristico dello spazio-tempo newtoniano è l'esistenza di una metrica spaziale euclidea. Cioè, a ogni superficie $S = \{(x^a, t), t = \text{costante}\}$ (che rappresenta una sezione spaziale dello spazio-tempo) viene assegnata una metrica euclidea dl^2, che misura la distanza tra due punti infinitamente vicini posti sulla superficie $t = \text{costante}$. Perciò è possibile scegliere coordinate (x^a) su S, tali che ponendo $E(x^a, t)$, $E'(x^a + dx^a, t)$ si ha $dl^2 = \sum_1^3 (dx^a)^2$. Inoltre si assume che dl^2 vari con continuità al variare della superficie $t = \text{costante}$. L'interpretazione fisica è che dl^2 rappresenti la distanza tra due punti infinitamente vicini misurata con un regolo rigido.

I tre postulati testé introdotti – 1) esistenza di una struttura differenziabile su V, 2) tempo assoluto t, 3) metrica spaziale euclidea dl^2 – definiscono una varietà galileiana che simbolicamente è rappresentata dalla terna (V, t, dl^2). Si definirà ora un sistema di riferimento galileiano. La linea oraria di una particella P è rappresentata da una curva C orientata verso il futuro di V. Se ad ogni punto di C viene associata una terna ortonormale di vettori spaziali $\mathbf{e}^1$, $\mathbf{e}^2$, $\mathbf{e}^3$, che varia con continuità lungo C, si ottiene un riferimento galileiano, che sarà indicato simbolicamente con $(P, 0, \mathbf{e}^a)$ dove 0 è un evento su C scelto come origine del tempo e del riferimento spaziale (cfr. fig. 2).

In tal modo a un evento arbitrario $p \in V$ vengono associate univocamente le coordinate (x^0, x^l) rispetto al riferimento galileiano $(P, 0, \mathbf{e}^a)$. Si trova facilmente che le trasformazioni di coordinate tra due riferimenti galileiani (x^a) e (x'^a) sono date dal gruppo cinematico K:

$$(1) \qquad x'^a = D^{ab}(t) x^b + d^a(t) \qquad t' = t + \tau$$

dove $D^{ab}(t)$ è una matrice ortogonale.

Fino ad ora è stata trattata solo la cinematica relativa. Scelto un particolare riferimento galileiano, schematizzabile come una particella materiale P che si trascina una terna ortonormale di assi spaziali, rispetto ad esso è possibile definire la velocità e l'accelerazione di un punto materiale Q. Inoltre, dalle formule di trasformazione tra due riferimenti galileiani è possibile dedurre come si tra-

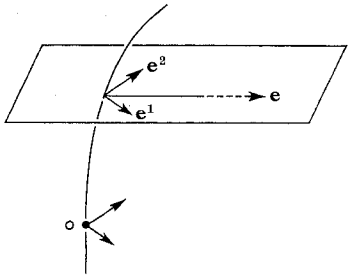


Figura 2.

Riferimento galileiano $(P, 0, \mathbf{e}^a)$.

sformano la velocità e l'accelerazione di un punto al cambiare del riferimento galileiano. Per formulare una dinamica occorre scegliere una classe di moti «privilegiati» che verranno definiti i moti d'una particella non soggetta a forze. I moti che si discostano da quelli privilegiati sono quindi spiegati in termini di forze.

In assenza di campi gravitazionali la scelta della classe di moti privilegiati avviene mediante il principio d'inerzia: «Esistono i moti liberi, che sono caratterizzati, rispetto a una particolare classe di riferimenti galileiani (cosiddetti riferimenti inerziali), dal fatto di avere accelerazione nulla». Cioè

$$\ddot{x}^a = 0. \tag{2}$$

Allora, dalle (1) si ha che le trasformazioni tra riferimenti inerziali sono date da

$$x'^a = D^{ab}x^b + d^a \qquad \dot{D}^{ab} = 0,\ \ddot{d}^a = 0. \tag{3}$$

Tali trasformazioni formano quindi un gruppo, detto gruppo di Galileo G, che è un sottogruppo proprio del gruppo cinematico K, $G \subset K$.

Dalla discussione precedente segue che per i moti che non sono liberi, in un riferimento inerziale, si ha

$$m\ddot{x}^a = F^a \tag{4}$$

dove la (4) s'intende come definizione di forza. La forza **F** definita dalla (4) è un vettore spaziale indipendente dal riferimento. Per vedere ciò basta dimostrare che l'accelerazione tra due particelle che passano per lo stesso evento con la stessa velocità è un vettore indipendente dal riferimento, il che è una conseguenza immediata delle formule di trasformazione (1).

La legge d'inerzia (2) definisce in modo naturale sulla varietà spazio-tempo V una connessione affine. Essa è la connessione tale che le sue geodetiche sono le curve di equazione $\ddot{x}^a = 0$ in un particolare sistema di coordinate, cioè rette dello spazio-tempo. Perciò i coefficienti della connessione, $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$, sono nulli in un riferimento inerziale e quindi $R^\alpha_{\beta\gamma\delta} = 0$ e la connessione è piatta. Lo spazio-tempo galileiano è quindi una varietà piatta.

Come si è detto precedentemente, la scelta della classe dei moti privilegiati operata dal principio d'inerzia è valida solo in assenza di forze gravitazionali. Tuttavia è noto che le forze gravitazionali non possono mai essere trascurate. Infatti ogni corpo, a causa del carattere universale della gravitazione, è dotato di una massa gravitazionale passiva μ, con cui interagisce con la gravità, oltre che di una massa inerziale m. Perciò è impossibile schermare le interazioni gravitazionali, al contrario di quanto succede con le interazioni elettromagnetiche (in quest'ultimo caso ciò è dovuto alla presenza di cariche di segno opposto). In un riferimento inerziale I (precedentemente definito) l'equazione del moto di una particella di massa inerziale m e massa passiva gravitazionale μ soggetta solo a forze gravitazionali è

$$m\ddot{x}^a = \mu g^a(x^p, t) \tag{5}$$

dove $g^a(x^p, t)$ descrive il campo gravitazionale.

Si supponga ora di essere in un riferimento accelerato (con accelerazione

$-A^a$) rispetto al riferimento inerziale considerato. Dalle (1) si ha, supponendo che gli assi dei due riferimenti rimangano paralleli, $\ddot{x}'^a = \ddot{x}^a + \ddot{d}^a = \ddot{x}^a - A^a$ da cui si ricava

$$\ddot{x}'^a = \frac{\mu}{m} g^a(x'^b, t) - A^a. \tag{6}$$

Ora, se il rapporto μ/m non fosse lo stesso per tutte le particelle, facendo cadere nel campo gravitazionale diverse particelle con rapporti diversi μ/m e misurando le relative accelerazioni $\ddot{x}'^a$, sarebbe possibile misurare separatamente g^a e A^a. In tal modo si potrebbe determinare sperimentalmente se un particolare riferimento galileiano è in moto accelerato rispetto a un riferimento inerziale e quindi il principio d'inerzia acquisterebbe un significato operativo. L'esperienza dice però che il rapporto μ/m è costante per tutte le particelle conosciute. Questo fatto, che prende il nome di principio di equivalenza debole, è stato verificato sperimentalmente con altissima precisione da Eötvös agl'inizi del secolo, da Dicke e collaboratori nel 1964 e infine da Brajinsky e Panov nel 1971 (cfr. il § 6 dell'articolo «Gravitazione» in questa stessa *Enciclopedia*). Ne risulta che, ponendo $\mu = m$ con un'opportuna scelta delle unità di misura, è possibile misurare solo $g^a - A^a$ e non g^a ed A^a separatamente. Perciò il principio d'inerzia, come formulato precedentemente, non ha una base operativa e quindi deve essere modificato.

La critica testé esposta al principio d'inerzia, insieme con considerazioni di relatività ristretta, portò Einstein a porre le basi della relatività generale, che fino ad ora è la piú soddisfacente teoria dello spazio-tempo e della gravitazione. Tuttavia, come dimostrato da Cartan nel 1922, è possibile riformulare la legge d'inerzia nell'ambito della meccanica non-relativistica, tenendo conto del principio di equivalenza. In tal modo si ottiene una teoria elegante dello spazio-tempo newtoniano che, nella sua formulazione geometrico-differenziale, prelude alla piú completa teoria di Einstein.

Si è visto che non esistono moti liberi nel senso della legge d'inerzia (2), a causa del fatto che tutti i corpi interagiscono allo stesso modo con il campo gravitazionale. Allora è naturale scegliere come classe di moti privilegiati non piú quelli rettilinei e uniformi, bensí i moti in caduta libera nel campo gravitazionale. Si arriva quindi a formulare la legge d'inerzia generalizzata: «esistono i moti in caduta libera, caratterizzati, rispetto a una particolare classe di riferimenti galileiani (detti riferimenti newtoniani), dalle equazioni del moto

$$\ddot{x}^a = -\frac{\partial \Phi}{\partial x^a}», \tag{7}$$

dove $\Phi(x^a, t)$ è il potenziale gravitazionale, una grandezza dipendente dal riferimento.

Per una particella soggetta a una forza esterna F non gravitazionale, le equazioni del moto in un riferimento newtoniano sono quindi

$$m\left(\ddot{x}^a + \frac{\partial \Phi}{\partial x^a}\right) = F^a. \tag{8}$$

Dalle (1) si ricavano le seguenti formule, che connettono due riferimenti newtoniani:

$$(9)\qquad \begin{aligned} x'^a &= D^{ab}x^b + d^a \\ \dot{D}^{ab} &= 0. \end{aligned}$$

Le trasformazioni (9) formano un gruppo N, detto gruppo di Heckmann-Schücking, che contiene il gruppo di Galileo G. Si ha $G \subset N \subset K$. Sotto l'azione di una trasformazione di Heckmann-Schücking il potenziale gravitazionale Φ diventa

$$(10)\qquad \Phi'(x'^a, t') = \Phi(x^a, t) - x'^a A^a$$

dove A^a è l'accelerazione del nuovo riferimento newtoniano rispetto al vecchio. Ciò traduce formalmente il significato del famoso esperimento concettuale proposto da Einstein per cui, rimanendo all'interno di un ascensore, non si può distinguere tra il caso in cui la cabina sia poggiata sulla superficie terrestre e quello in cui la cabina è accelerata verso l'alto con accelerazione $-g$.

La legge d'inerzia generalizzata definisce in modo naturale una connessione affine simmetrica Γ su V. È la connessione tale che in un riferimento newtoniano l'equazione delle geodetiche è la (7). Ricordando l'equazione delle geodetiche

$$\frac{d^2x^\alpha}{dt^2} + \Gamma^\alpha_{\beta\gamma}\frac{dx^\beta}{dt}\frac{dx^\gamma}{dt} = 0$$

dove $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma} = \Gamma^\alpha_{\gamma\beta}$, e paragonando con la (7) si ricava che gli unici coefficienti non nulli della connessione sono

$$(11)\qquad \Gamma^l_{00} = \frac{\partial\Phi}{\partial x^l} \qquad l = 1, 2, 3.$$

Per vedere se la connessione definita dalla (11) è piatta, basta calcolare il tensore di curvatura. Si trova

$$(12)\qquad R^l_{0m0} = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^l \partial x^m}$$

mentre tutte le altre componenti sono nulle. Perciò si ha che, in generale, la connessione newtoniana Γ è curva, a meno che sia $\partial^2\Phi/\partial x^l \partial x^m = 0$ cioè Φ uguale a una funzione lineare delle coordinate. In quest'ultimo caso però, Φ può essere annullato con un opportuno cambiamento di riferimento newtoniano mediante una trasformazione di Heckmann-Schücking. Perciò un campo gravitazionale effettivo deve essere rappresentato da una connessione non piatta. Si vede quindi che lo spazio-tempo newtoniano, definito formalmente dalla terna (V, t, Γ) è una varietà curva, in contrasto con lo spazio-tempo galileiano. Questa elegante formulazione geometrica, dovuta inizialmente a Cartan, mostra che per una descrizione corretta della gravitazione newtoniana è necessario servirsi di varietà curve. L'uso della geometria euclidea elementare, anche se sufficiente a descrivere lo spazio ordinario tridimensionale, è del tutto ingiustificato nella descrizione del pur semplice spazio-tempo newtoniano.

Dalla (12) si può dedurre un interessante risultato, che spiana la strada, come si vedrà in seguito, alle equazioni di Einstein per il campo gravitazionale. Dal tensore di Riemann, per contrazione, si può formare un nuovo tensore a due indici, $R_{\beta\gamma} = R^\alpha_{\beta\alpha\gamma}$, detto tensore di Ricci. Dalla (12) ci si può calcolare il tensore di Ricci della connessione Γ, ottenendo

$$(13)\qquad R_{00} = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^l \partial x^l} = \Delta\Phi$$

e tutte le altre componenti sono nulle. Ne segue che l'equazione di Poisson, che lega il potenziale gravitazionale Φ alla distribuzione di densità di massa ρ, $\Delta\Phi = 4\pi G\rho$, può essere riscritta nella forma

$$(14)\qquad R_{00} = 4\pi G\rho,$$

forma che prelude alle equazioni di Einstein. Si vede perciò come, una volta riformulata geometricamente la meccanica newtoniana, si passi in qualche modo naturalmente alla relatività generale.

In chiusura di questa sezione, ecco qualche cenno al principio di Mach. Si vedrà come sia possibile formulare rigorosamente il principio di Mach nell'ambito dello spazio-tempo newtoniano.

La legge d'inerzia generalizzata stabilisce l'esistenza di una classe di moti «in caduta libera» (fatto empirico) e li eleva al rango di moti privilegiati per costruire la dinamica. Inoltre definisce i riferimenti newtoniani come quelli nei quali i moti in caduta libera hanno per equazione $\ddot{x}^a = -\partial\Phi/\partial x^a$. Empiricamente i riferimenti newtoniani possono essere definiti come quelli in cui una particella in caduta libera non è soggetta a forze di tipo centrifugo ($\sim m\omega^2\mathbf{r}$) o di Coriolis ($2\boldsymbol{\omega}\wedge\mathbf{v}$). Cioè i riferimenti newtoniani sono quelli non rotanti. Infatti in un riferimento rotante rispetto a uno newtoniano, la (7) non vale piú, ma diventa

$$(15)\qquad \ddot{\mathbf{x}} = -\nabla\Phi - 2\boldsymbol{\omega}\wedge\dot{\mathbf{x}} - \dot{\boldsymbol{\omega}}\wedge\mathbf{x} - \boldsymbol{\omega}\wedge(\boldsymbol{\omega}\wedge\mathbf{x})$$

per cui, avendo a disposizione diverse particelle di prova e misurando i rispettivi $\dot{\mathbf{x}}$, $\ddot{\mathbf{x}}$ è possibile risalire a $\boldsymbol{\omega}$. Perciò la legge d'inerzia generalizzata dà un criterio ben preciso per individuare i riferimenti newtoniani. Rimane però il problema di sapere cosa determina i riferimenti newtoniani. Sarà bene partire da un esempio. Un riferimento cartesiano formato da un ascensore che cade verso il centro della Terra non è un riferimento newtoniano a causa della rotazione terrestre. Infatti nell'ascensore vengono rivelate delle (seppur deboli) forze centrifughe e di Coriolis. Si trova invece che un riferimento in caduta libera verso il Sole e non ruotante rispetto alle stelle lontane è con buona approssimazione un riferimento newtoniano. Si ha perciò un criterio astronomico per la determinazione del carattere newtoniano (o meno) di un riferimento (assenza di rotazione rispetto alle stelle fisse) che coincide con il criterio dinamico locale (assenza di forze centrifughe e di Coriolis agenti su di una particella libera). Questa coincidenza di due criteri che sono logicamente del tutto distinti è un fatto empirico che rimane ancora senza una spiegazione esauriente nell'ambito della fisica moderna. La precisione con cui il criterio astronomico coincide con quello dinamico

locale viene rafforzata da una elaborata analisi compiuta da Collins e Hawking nell'ambito della cosmologia relativistica. È possibile quindi enunciare una prima formulazione del principio di Mach (che verrà chiamato M1): «Il principio di Mach, cosí come viene comunemente inteso, afferma che la coincidenza del criterio astronomico con quello dinamico non è accidentale ma deve derivare in qualche modo da leggi fisiche piú profonde». Tale principio prende il nome dal fisico e filosofo austriaco Ernst Mach, il primo a sostenere, in un suo famoso libro [1883] che le proprietà inerziali di un riferimento devono in qualche modo dipendere dalla distribuzione di materia nell'universo. La formulazione di tale principio essendo necessariamente vaga, ha dato e dà tuttora origine a diverse interpretazioni [cfr. Dicke 1964]. Nell'ambito della riformulazione della meccanica newtoniana già discussa, è possibile dare una definizione non ambigua del principio di Mach. In tal caso, come nella corrispettiva formulazione relativistica, il principio di Mach viene enunciato in modo leggermente diverso (che verrà chiamato M2): «Le forze inerziali-gravitazionali che agiscono su di una particella libera devono essere generate esclusivamente dalla distribuzione di materia nell'universo».

In termini matematici ciò vuol dire che il «vero campo gravitazionale», quello che non può essere annullato mediante un cambiamento di riferimento newtoniano, cioè $\partial^2\Phi/\partial x^l \partial x^m$, deve essere determinato completamente ed esclusivamente dalla distribuzione di massa nell'universo. A tale enunciato si può dare forma rigorosa mediante la teoria delle «inverse generalizzate». Un risultato simile vale in relatività generale, dove il campo gravitazionale è descritto dal tensore di Riemann. Raine ha dimostrato che l'enunciato M2 può essere formulato rigorosamente in relatività generale, imponendo che il tensore di Riemann $R^{\alpha}_{\beta\gamma\delta}$ sia determinato univocamente dal tensore energia-impulso $T_{\alpha\beta}$ (che dà la distribuzione energetica della materia) e che a sua volta il tensore metrico $g_{\alpha\beta}$ sia determinato univocamente dal tensore di Riemann.

3. *I punti singolari dello spazio-tempo.*

3.1. Lo spazio-tempo di Minkowski e la relatività ristretta.

La teoria dello spazio-tempo newtoniano discussa nel paragrafo precedente deve essere confrontata con un importante fatto sperimentale: l'indipendenza della velocità della luce dal sistema di riferimento. Quest'ultimo è il risultato della famosa esperienza di Michelson-Morley [cfr. Weinberg 1972] successivamente confermato da una serie di altre raffinate esperienze, ed è alla base della relatività ristretta. Come si vedrà, gli assiomi che definiscono lo spazio-tempo newtoniano sono inconsistenti con il fatto dell'indipendenza della velocità della luce dal riferimento. Perciò alcuni di questi assiomi devono essere abbandonati. La geniale intuizione di Einstein [cfr. Synge 1965] fu quella di abbandonare l'assioma del tempo assoluto e di conseguenza l'intera struttura causale dello spazio-tempo newtoniano.

Il punto di partenza è la misura, prima con metodi astronomici e poi con esperimenti terrestri, della velocità di propagazione della luce. Si trova che la luce si propaga con velocità $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec lungo linee rette, rispetto a un riferimento newtoniano I centrato approssimativamente nel Sole. È ovvio quindi che la propagazione della luce (con velocità c lungo linee rette) definisce un riferimento newtoniano I che è privilegiato. Infatti, dalle equazioni di trasformazione tra riferimenti newtoniani, usando il fatto che in I un raggio di luce ha per equazione $\ddot{x} = 0$, $\dot{x}^2 = c^2$, si trova che gli unici altri riferimenti in cui tali proprietà valgono sono quelli ottenuti da I con una rotazione rigida o traslazione indipendenti dal tempo. Quindi il riferimento I, definito a meno di una rotazione rigida o di una traslazione dell'origine, può identificarsi con l'etere della fisica prerelativistica. Rispetto a tale etere la Terra dovrebbe avere una velocità ben definita. Trascurando temporaneamente l'effetto della gravità, dalle formule di trasformazione (1) tra riferimenti galileiani è possibile dedurre che la velocità della luce rispetto al riferimento terrestre (solidale con la Terra) è $c \pm v$, dove v è il modulo della velocità della Terra rispetto all'etere. Ora, dalle osservazioni astronomiche si deduce che l'etere coincide approssimativamente con un riferimento galileiano solidale con il Sole. Quindi si ha che la velocità della Terra rispetto all'etere, a causa del suo moto orbitale attorno al Sole, cambia segno dopo un periodo di sei mesi. Di conseguenza la velocità della luce rispetto alla Terra dovrebbe cambiare di una quantità $\pm 2v$ in un periodo di sei mesi. È questa variazione che Michelson e Morley cercarono di mettere in evidenza mediante osservazioni ottiche sullo spostamento di opportune frange d'interferenza con un periodo di sei mesi. Il risultato dei loro esperimenti fu negativo, cioè $v \approx 0$ con ottima precisione. Ciò è sorprendente qualora si pensi che la sola velocità orbitale della Terra attorno al Sole è dell'ordine di 30 km/sec. Si conclude che la struttura dello spazio-tempo galileiano è in contraddizione con il fatto sperimentale dell'indipendenza della velocità della luce dal riferimento.

La struttura dello spazio-tempo galileiano comprende i seguenti elementi:

1) una varietà differenziabile V;
2) un tempo assoluto $t : V \to \mathbf{R}$;
3) una metrica euclidea su ciascuna delle sezioni spaziali $t =$ costante;
4) una connessione affine $\Gamma^{\alpha}_{\beta\gamma}$ tale che i moti privilegiati, quelli che per definizione si realizzano in assenza di forze, sono le geodetiche della connessione affine $\Gamma^{\alpha}_{\beta\gamma}$.

Gli assiomi 1) e 4) devono essere mantenuti se si vuole preservare il carattere continuo dello spazio-tempo e la possibilità d'inquadrare geometricamente il principio d'inerzia (che non è messo in discussione dal risultato dell'esperimento di Michelson-Morley). Nel 1905 Einstein propose di abbandonare l'assioma 2) e di conseguenza anche gli assiomi 3) e 4). Le giustificazioni per tale scelta sono numerose. Qui se ne possono ricordare solamente due, che sembrano le piú significative.

La prima si basa sulla critica al concetto di simultaneità operata da Einstein. Se si assume come principio il fatto sperimentale della indipendenza della velo-

cità della luce dal sistema di riferimento, allora non è possibile dare una definizione operativa del tempo assoluto t. Infatti, si vedrà in seguito che due eventi, simultanei rispetto a un osservatore, in generale non lo sono piú rispetto a un altro osservatore in moto relativo.

La seconda si basa su di una critica alle formule di trasformazione tra due riferimenti galileiani

$$(16)\qquad \begin{aligned} x'^m &= L^m_n x^n + d^m \\ t' &= t + c. \end{aligned}$$

Se si considerano le equazioni di Maxwell per il campo elettromagnetico, si vede che tali equazioni non rimangono invariate in forma per una trasformazione del tipo (16). Perciò le usuali formule di trasformazione (16), mentre lasciano invariate le leggi dinamiche, agiscono cambiandole sulle leggi dell'elettromagnetismo. In particolare, ricordando che la luce non è altro che un fenomeno elettromagnetico e applicando ad un'onda elettromagnetica le trasformazioni (16), si trova che la velocità di tale onda si compone con quella dell'osservatore cosí come per una particella. Cioè si ritrova la nota regola per cui, rispetto a un osservatore avente velocità v relativamente all'etere, la velocità della luce dovrebbe essere $c+v$, risultato che è contraddetto dall'esperimento di Michelson-Morley. Invece le equazioni di Maxwell sono invarianti in forma rispetto a un diverso gruppo di trasformazioni (dette di Lorentz)

$$x' = \gamma(x - vt) \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \qquad \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}.$$

Tali trasformazioni preservano le leggi dell'elettromagnetismo, ma non quelle della dinamica, in quanto si ha, in generale, $t' \neq t$ (avendo scelto la stessa origine dei tempi). L'idea originale di Einstein è stata quella di abbandonare l'assioma del tempo assoluto e di sostituirlo con quello dell'indipendenza della velocità della luce dal sistema di riferimento. Perciò il risultato dell'esperimento di Michelson-Morley viene posto come assioma per la costruzione di una nuova struttura per lo spazio-tempo.

Si esaminerà ora il tipo di struttura che viene introdotta nello spazio-tempo. Si postula il seguente assioma:

POSTULATO DELLA RELATIVITÀ SPECIALE. *Esiste una classe di riferimenti, detti inerziali, tali che: a) in un tale riferimento l'equazione di un raggio luminoso è*

$$(17)\qquad (dx^m, dx^m) - c^2(dt)^2 = 0;$$

b) in un tale riferimento il moto di una particella non soggetta a forze è dato da $\ddot{x}^a = 0$.

L'enunciato *a*) traduce l'indipendenza della velocità della luce dal riferimento. Infatti la (17) significa che lo spostamento infinitesimo del fronte d'onda luminoso nel tempuscolo dt è proprio uguale a $c\,dt$; e che (dx^m, dx^m) e $(dt)^2$ possono variare nel passare da un riferimento inerziale a un altro, ma il loro rapporto deve rimanere costante. Ovviamente la (17) è in contrasto con l'ipotesi del tempo

assoluto $t' = t$. L'enunciato *b*) non è altro che il principio d'inerzia (in assenza di gravità) che quindi ritiene la sua forma.

Si è ora in grado di ricavare le trasformazioni tra due riferimenti inerziali. L'enunciato *b*) dice che un moto rettilineo e uniforme in un particolare riferimento inerziale deve apparire tale in qualsiasi altro riferimento inerziale. Perciò le formule di trasformazione che connettono due riferimenti inerziali devono essere lineari. Allora, sfruttando l'equazione (17), si trovano le trasformazioni di Lorentz. Nel caso particolare in cui i due riferimenti si muovono l'uno rispetto all'altro lungo l'asse delle x, con velocità relativa v, e coincidono al tempo $t = 0$, le trasformazioni di Lorentz prendono la forma, già descritta:

$$(18)\qquad x' = \gamma(x - vt) \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \qquad \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}.$$

Dalle (18) si vede subito che due eventi simultanei rispetto al riferimento I $(xyzt)$ non lo sono piú rispetto al nuovo riferimento I' $(x'y'z't')$. Infatti siano (x^1, y^1, z^1, t^1) e (x^2, y^2, z^2, t^2) i due eventi rappresentati in I, con $t^1 = t^2$ ma $x^1 \neq x^2$. Allora, in I' essi hanno le coordinate (x'^1, y'^1, z'^1, t'^1) e (x'^2, y'^2, z'^2, t'^2) con $t'^2 - t'^1 = \gamma(v/c^2)(x^2 - x^1) \neq 0$. Perciò il concetto di simultaneità ha senso solo rispetto a un particolare riferimento e quindi non ha valore assoluto.

Ora si ritorni alla costruzione di una struttura geometrica per lo spazio-tempo. Introdotta la notazione $x^0 = ct$, la (17) si scrive $(dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 - (dx^0)^2 = 0$. Nel riferimento inerziale scelto, s'introduca la matrice $\eta_{\alpha\beta}$ di componenti $\eta_{\alpha\beta} = \mathrm{diag}(-1, +1, +1, +1)$ per cui la (17) si scrive

$$(19)\qquad \eta_{\alpha\beta}(dx^\alpha)(dx^\beta) = 0.$$

Si può dimostrare che le trasformazioni di Lorentz sono quelle che lasciano invariata la forma quadratica $\eta_{\alpha\beta}(dx^\alpha)(dx^\beta)$ (e non solo il suo annullarsi), per cui, nel passare da un riferimento (x^α) a un altro (x'^α) si ha $\eta'_{\alpha\beta}(dx'^\alpha)(dx'^\beta) = \eta_{\alpha\beta}(dx^\alpha)(dx^\beta)$ con $\eta'_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta}$ (numericamente). Segue dai criteri di tensorialità che le $\eta_{\alpha\beta}$ si possono interpretare come le componenti covarianti di un tensore doppio simmetrico che definisce una metrica sulla varietà spazio-tempo. Nel caso presente il tensore ha le stesse componenti (costanti) in tutti i riferimenti inerziali e prende il nome di tensore metrico di Minkowski.

Si è già detto che un tensore metrico definisce in modo univoco una connessione simmetrica $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$. Poiché in un riferimento inerziale I il tensore metrico $\eta_{\alpha\beta}$ è costante, si ha $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma} = 0$ in I. Cioè la connessione Γ definita dal tensore metrico di Minkowski è piatta. Perciò le geodetiche di Γ sono delle linee rette in un riferimento inerziale, in accordo con il principio d'inerzia. Si vede perciò che l'assegnazione del tensore metrico di Minkowski $\eta_{\alpha\beta}$ unifica i due enunciati *a*) e *b*). Da una parte, infatti, mediante la forma quadratica ad esso associata, $\eta_{\alpha\beta}$ descrive il comportamento della luce in un riferimento inerziale; dall'altra, mediante la connessione Γ associata a $\eta_{\alpha\beta}$, viene descritto il moto di una particella non soggetta a forze in un riferimento inerziale.

In questo paragrafo sono state del tutto trascurate le forze gravitazionali e perciò la teoria sviluppata finora prende il nome di relatività speciale o ristretta,

per distinguerla dalla relatività generale sviluppata da Einstein successivamente e che include la gravità. Si è notato precedentemente che non è corretto ignorare l'interazione gravitazionale in quanto ogni particella interagisce mediante la sua massa con il campo gravitazionale delle altre masse nell'universo. Inoltre si è già visto che, a causa del principio di equivalenza, non è possibile determinare il carattere inerziale di un particolare riferimento. Per includere il campo gravitazionale e descrivere in modo unificato la propagazione della luce e i moti inerziali, Einstein propose, nel 1916, di introdurre sulla varietà spazio-tempo V un tensore metrico non costante $g_{\alpha\beta}$. Ovviamente, in un dato punto $g_{\alpha\beta}$ può sempre ridursi al tensore di Minkowski $\eta_{\alpha\beta}$ con una opportuna scelta delle coordinate (fisicamente, mettendosi in un riferimento inerziale) e perciò la propagazione della luce, definita da $\eta_{\alpha\beta}\, dx^\alpha\, dx^\beta = 0$, non viene alterata localmente. Inoltre, la connessione Γ definita da $g_{\alpha\beta}$, che è in generale curva, descrive i moti per inerzia e quindi viene ad essere identificata con la forza gravitazionale. Infatti si può porre $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma} = 0$ in un dato punto e quindi si ritrova il principio d'inerzia ($\ddot{x} = 0$) localmente. Si ottiene quindi una teoria che generalizza la relatività speciale e comprende i fenomeni gravitazionali, teoria di cui ci si occuperà piú in dettaglio nel prossimo paragrafo.

Ritornando alla relatività speciale, si vede che la struttura dello spazio-tempo è data dalla coppia $(V, \eta_{\alpha\beta})$ dove V è la varietà differenziabile $\mathbf{R}^4$ e $\eta_{\alpha\beta}$ è il tensore metrico di Minkowski: la coppia $(V, \eta_{\alpha\beta})$ si chiama spazio-tempo di Minkowski. Si studierà ora la struttura causale dello spazio-tempo di Minkowski, assumendo l'interpretazione usuale della relatività speciale, cioè che non si possono propagare segnali con velocità maggiori di quella della luce. Ciò discende in particolare dalla realtà delle trasformazioni di Lorentz, per cui per essere γ reale, deve aversi $v < c$. Esistono però altre interpretazioni della relatività [cfr. Recami 1974], il cui status teorico e sperimentale non è del tutto chiaro, in cui può aversi $v > c$. Le ipotetiche particelle muoventisi con velocità maggiore della

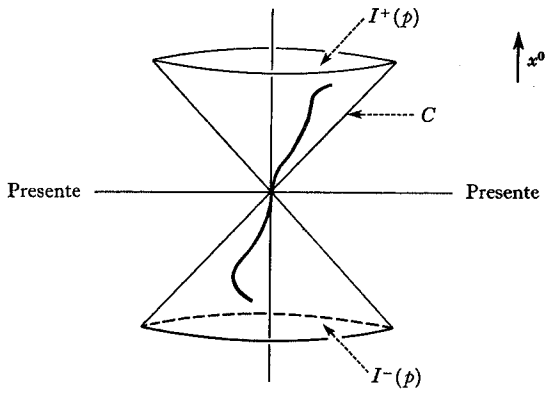


Figura 3.
Cono di luce C per l'evento p che costituisce il vertice del cono.

luce si chiamano tachioni. Qui si supporrà $v < c$ per particelle materiali e $v = c$ per quanti di luce (nel vuoto).

Per studiare la struttura causale per lo spazio-tempo di Minkowski, occorre intanto definire le curve causali. Esse sono le curve che corrispondono a traiettorie di particelle che viaggiano con velocità $v < c$, o di quanti di luce (fotoni) che viaggiano con velocità $v = c$. Perciò il futuro e il passato causale di un evento p possono essere rappresentati dal diagramma della figura 3 (dove per semplicità è stata soppressa una dimensione spaziale).

In coordinate inerziali (x^0, x^i) con $x^0 = ct$ e scegliendo $p(0, 0, 0, 0)$ si definisce il cono di luce C dall'equazione $(x^1)^2 + (x^2)^2 + (x^3)^2 - (x^0)^2 = 0$. Si chiama cono di luce perché rappresenta il luogo, nello spazio-tempo, delle traiettorie dei fotoni che possono essere emessi o assorbiti in p. Le traiettorie di tali fotoni, essendo linee rette, sono proprio le rette generatrici del cono di luce. Una qualsiasi curva che rimane interna al cono di luce rappresenta la traiettoria di una particella materiale. Le curve causali sono perciò tutte le curve interne al cono di luce e le rette generatrici di esso. Ne segue che il futuro causale di p coincide con la falda superiore del cono di luce e il passato causale di p con la falda inferiore del cono di luce. Contrariamente al caso newtoniano, le due falde non sono contigue, ma sono separate da una regione che rappresenta il presente dell'evento p. È questa la differenza topologica essenziale tra la causalità newtoniana e la causalità relativistica. Il presente newtoniano è rappresentato da un iperpiano, il che significa una velocità limite infinita per la propagazione dei segnali. Il presente relativistico è invece un aperto dello spazio-tempo, determinato dal valore limite finito per la velocità di propagazione dei segnali. La struttura causale newtoniana si ritrova come limite di quella relativistica per $c \to \infty$; in tal caso infatti il presente relativistico degenera in un iperpiano.

3.2. Lo spazio-tempo della relatività generale.

Lo scopo della relatività generale è quello di fondere la relatività speciale con la gravitazione. Anzitutto bisogna tener presente che la relatività speciale è ben verificata negli esperimenti di laboratorio. In particolare, nei moderni acceleratori di particelle è possibile accelerare alcune particelle elementari a velocità prossime a c e quindi verificare le previsioni della relatività speciale sul rallentamento degli orologi in moto, la composizione delle velocità, ecc. con ottima precisione. Si può quindi assumere valida la relatività speciale almeno al livello di esperimenti locali, terrestri. Ne segue che qualsiasi teoria che volesse comprendere anche la gravitazione deve necessariamente raccordarsi con le leggi della relatività speciale in un ambito locale.

Per quanto riguarda il punto *b*) del postulato della relatività speciale, alla definizione di riferimento inerziale in relatività speciale possono essere riferite le critiche rivolte alla definizione di riferimento inerziale nello spazio-tempo newtoniano. Cioè che a causa del principio di equivalenza è impossibile determinare se un certo riferimento è in moto accelerato uniforme rispetto ad un riferimento inerziale. Questo è una conseguenza del fatto che per ciascuna parti-

cella il rapporto massa gravitazionale / massa inerziale è una costante universale.

Si potrebbe pensare di sfruttare la proprietà *a*) per distinguere un riferimento accelerato uniformemente da uno inerziale. Che ciò non sia possibile è il risultato degli esperimenti di Pound e Rebka e di Pound e Snider [cfr. Misner, Thorne e Wheeler 1973]. Tali esperimenti dimostrano che il principio di equivalenza vale non solo per le particelle materiali ma anche per i fotoni.

Si consideri il seguente esperimento ideale in cui un osservatore A si trova alla base di un ascensore mentre un secondo osservatore B si trova sul soffitto dell'ascensore. Inizialmente l'ascensore è a riposo in un riferimento inerziale dato I. Al tempo $t=0$ l'osservatore A emette un fotone di frequenza ν diretto verso l'alto. Simultaneamente l'ascensore viene accelerato verso l'alto con un'accelerazione costante a. Siano A e B separati da una distanza h. Sia Ib il riferimento inerziale istantaneamente solidale con B. Al tempo $t=0$, Ib coincide con I. Il fotone emesso da A raggiungerà B dopo un tempo T, misurato in I. Allora il riferimento Ib avrà istantaneamente la velocità $V_B = aT$ rispetto a I. Perciò, applicando le leggi dell'elettromagnetismo (o equivalentemente le trasformazioni di Lorentz) nei riferimenti I e Ib si ottiene che il fotone emesso inizialmente da A con frequenza ν sarà ricevuto in Ib, a causa dell'effetto Doppler, con una frequenza $\nu' = \nu(1-(v/c)) = \nu(1-(aT/c))$. D'altra parte si ha $T = h/c$ (dove sia T sia h sono misurati nello stesso riferimento I) e quindi il fotone è osservato da B con frequenza

$$\nu' = \nu\left(1-\frac{ah}{c^2}\right) < \nu, \tag{20}$$

cioè subisce uno spostamento verso il rosso. Ora, se il principio di equivalenza valesse anche per i fotoni, le due seguenti situazioni dovrebbero essere completamente equivalenti: 1) ascensore accelerato verso l'alto con accelerazione costante $-g$; 2) ascensore posto sulla superficie terrestre. In tal caso, dunque, un fotone emesso con frequenza ν dal basso di un ascensore posto sulla superficie della Terra dovrebbe essere ricevuto da un osservatore posto sul soffitto con una frequenza ν' spostata verso il rosso, data dalla (20), cioè $\nu' = \nu(1-(gh/c^2))$. L'esperimento di Pound e Snider, che è un perfezionamento dell'esperimento di Pound e Rebka, ha verificato tale effetto con una precisione dell'1 per cento.

Si può perciò considerare ben confermato sperimentalmente il principio di equivalenza, nella sua formulazione debole, anche per i fotoni. Ne segue che né con esperienze di carattere meccanico, né con esperienze di tipo ottico, è possibile distinguere tra un riferimento uniformemente accelerato rispetto a uno inerziale I, e un campo gravitazionale costante in I. I campi gravitazionali esistenti in natura sono non-omogenei e variabili nel tempo, ma in piccole regioni dello spazio e per piccoli intervalli di tempo è possibile considerarli approssimativamente costanti. Perciò si può dire che l'esperienza conferma la validità del seguente principio:

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA DEBOLE. *In una regione dello spazio-tempo sufficientemente piccola non è possibile distinguere, con mezzi ottici o meccanici, tra un campo gravitazionale e un riferimento accelerato.*

L'idea che sta alla base della teoria einsteiniana della gravitazione consiste nell'estendere universalmente la validità di tale principio, non limitandolo cioè alle sole esperienze di carattere ottico o meccanico. Si può quindi enunciare l'altro principio:

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA FORTE. *In una regione sufficientemente piccola dello spazio-tempo non è possibile distinguere, con esperimenti di nessun tipo, tra un campo gravitazionale e un riferimento accelerato.*

Ne segue che, localmente, è sempre possibile eliminare l'effetto del campo gravitazionale mettendosi in un opportuno riferimento accelerato. È quindi possibile definire operativamente i riferimenti «localmente inerziali» come quelli in caduta libera nel campo gravitazionale. In essi vale approssimativamente la legge d'inerzia di Galileo, nel senso seguente: «Una particella non soggetta ad altre forze che a quelle gravitazionali, posta abbastanza vicina all'osservatore, si muove di moto rettilineo uniforme durante un intervallo di tempo sufficientemente piccolo».

Si riassumerà ora brevemente la discussione precedente. Si è anzitutto messa in dubbio l'esistenza dei riferimenti inerziali «globali» della relatività speciale. L'argomentazione è modellata su quella del § 2.3 riguardante il passaggio dallo spazio-tempo galileiano a quello newtoniano, con in piú l'aggiunta dei fenomeni ottici con la discussione dell'esperienza di Pound e Rebka. Si trova che i riferimenti inerziali globali della relatività speciale non sono operativamente definibili. Infatti una particella dotata di massa interagisce sempre con il campo gravitazionale e a causa del principio di equivalenza solo la differenza $g(x, t) - A(x, t)$ è misurabile, dove g rappresenta il campo gravitazionale e A è l'accelerazione del riferimento considerato rispetto a uno inerziale. Perciò non è possibile, con esperimenti di carattere meccanico, verificare il carattere inerziale di un riferimento. Lo stesso risultato vale anche se si opera con metodi ottici, come garantisce l'esperienza di Pound e Rebka. Si è invece visto che è possibile definire operativamente i riferimenti «localmente» inerziali, come quelli in caduta libera nel campo gravitazionale. Perciò ogni teoria che comprenda la gravitazione newtoniana e la relatività ristretta (superandole) deve ammettere l'esistenza dei riferimenti localmente inerziali.

I riferimenti globalmente inerziali sono stati introdotti in relatività speciale perché si sono scelti i moti rettilinei uniformi come moti privilegiati, cioè non soggetti a forze. Poiché ciò è in contrasto con l'esperienza, è necessario scegliere una diversa classe di moti da considerare privilegiati. Non si può però procedere come nel § 2.3, in cui tali moti sono stati definiti come quelli per cui $\ddot{x}^m = -\partial\Phi/\partial x^m$, in quanto la teoria newtoniana della gravitazione è in contraddizione con le trasformazioni di Lorentz della relatività speciale. Occorre cercare una classe di moti privilegiati che generalizzi i moti rettilinei e uniformi, e contemporaneamente una nuova descrizione del campo gravitazionale che sia in accordo (localmente) con la relatività speciale. Guidati dall'analogia con il procedimento utilizzato nel § 1, si supponga di avere una connessione affine $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$ definita sulla varietà spazio-tempo. Si scelgano allora come moti privilegiati,

cioè non soggetti a forze, quelli lungo le geodetiche della connessione Γ, vale a dire

$$\frac{d^2x^\alpha}{ds^2}+\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}\frac{dx^\beta}{ds}\frac{dx^\gamma}{ds}=0 \tag{21}$$

con s parametro affine. Ovviamente, in presenza di un campo gravitazionale, le $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$ non devono essere tutte nulle, altrimenti si ritroverebbero i moti rettilinei uniformi. Si noti che la (21) è generalmente covariante, cioè che la sua forma è indipendente dalle coordinate scelte. Questo è un notevole vantaggio rispetto alle corrispondenti formulazioni della meccanica newtoniana e della relatività speciale; in esse infatti le equazioni dei moti privilegiati prendono una forma semplice solo in particolari sistemi di coordinate privilegiate. I gruppi di Galileo, di Heckmann-Schücking e di Lorentz nascono poi come trasformazioni tra sistemi di coordinate privilegiate.

Un paragone tra la (21) e la simile equazione (7) dello spazio-tempo newtoniano mostra l'analogia tra $\nabla\Phi$ (il vettore di componenti $\partial\Phi/\partial x^\alpha$) e $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$ per cui le componenti della connessione $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$ devono descrivere la forza gravitazionale. Dalla geometria differenziale si sa che in un intorno di un evento $p\in V$ è possibile scegliere un sistema di coordinate (x^α) tale che in p si abbia $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}(p)=0$. Ne segue che in tale intorno la (21) diventa

$$\frac{d^2x^\alpha}{ds^2}=0 \tag{22}$$

a meno di infinitesimi di ordine superiore. La (22) rappresenta, in piccolo, la legge d'inerzia galileiana. Per la discussione precedente bisogna quindi identificare il sistema di coordinate in cui $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}(p)=0$ con un riferimento «localmente inerziale» in p. Si è già visto che in un tale riferimento vale il postulato della relatività speciale, che si può condensare nel postulato dell'esistenza di una metrica di Minkowski $\eta_{\alpha\beta}$. Perciò si può assumere che in p sia assegnata la metrica di Minkowski $\eta_{\alpha\beta}$ nel sistema di coordinate (x^α) previamente discusso. Poiché questo risultato può applicarsi a qualsiasi evento di V, per motivi di continuità si può ammettere che su V sia assegnato un tensore metrico $g_{\alpha\beta}$ tale che, localmente, in ogni punto p si possa ridurre alla metrica di Minkowski in un particolare sistema di coordinate (x^α). Si dimostra che tale sistema di coordinate può essere scelto in modo che si abbia $g_{\alpha\beta}(p)=\eta_{\alpha\beta}$, $(\partial g_{\alpha\beta}/\partial x^\gamma)(p)=0$, $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}(p)=0$. Allora, sfruttando il fatto che la differenza tra due connessioni è un tensore, si può dimostrare che $\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}$ è la connessione affine derivata dalla metrica $g_{\alpha\beta}$, cioè

$$\Gamma^\alpha_{\beta\gamma}=\frac{1}{2}g^{\alpha p}\left(\frac{\partial g_{p\beta}}{\partial x^\gamma}+\frac{\partial g_{p\gamma}}{\partial x^\beta}-\frac{\partial g_{\beta\gamma}}{\partial x^p}\right)$$

Si arriva quindi ad enunciare il seguente postulato:

PRIMO POSTULATO FONDAMENTALE DELLA RELATIVITÀ GENERALE. *Lo spazio-tempo è una varietà differenziabile quadridimensionale V munita di una metrica pseudoriemanniana $g_{\alpha\beta}$ di segnatura $(+++-)$. Le geodetiche di tipo luce (quelle per le quali $g_{\alpha\beta}\frac{dx^\alpha}{ds}\frac{dx^\beta}{ds}=0$) rappresentano i raggi luminosi. Le geodetiche di tipo tempo (caratterizzate da $g_{\alpha\beta}\frac{dx^\alpha}{ds}\frac{dx^\beta}{ds}<0$) rappresentano le traiettorie delle particelle in caduta libera nel campo gravitazionale. Il parametro affine s rappresenta il tempo proprio delle particelle* (il tempo misurato con un orologio solidale con la particella).

L'ultimo enunciato sui raggi luminosi e sulle particelle materiali è ovviamente una conseguenza della validità in piccolo della relatività speciale. Infatti, in un riferimento localmente inerziale,

$$\eta_{\alpha\beta}\frac{dx^\alpha}{ds}\frac{dx^\beta}{ds}=0 \qquad \text{per un raggio di luce}$$

$$\eta_{\alpha\beta}\frac{dx^\alpha}{ds}\frac{dx^\beta}{ds}<0 \qquad \text{per una particella materiale.}$$

Ne segue che, in coordinate generali (x^α),

$$g_{\alpha\beta}\frac{dx^\alpha}{ds}\frac{dx^\beta}{ds}=0 \qquad \text{per i raggi di luce}$$

$$g_{\alpha\beta}\frac{dx^\alpha}{ds}\frac{dx^\beta}{ds}<0 \qquad \text{per le particelle materiali.}$$

Con l'enunciazione del primo postulato fondamentale è stata fondata la prima parte di una teoria dinamica, la parte che descrive l'azione del campo sulle particelle. Descrivendo infatti il campo gravitazionale con il tensore metrico $g_{\alpha\beta}$, si sa, dall'equazione delle geodetiche, come si muovono un fotone o una particella materiale sotto l'azione di tale campo. La seconda parte di una teoria dinamica consiste nel determinare il campo generato da una data distribuzione di materia. Tale divisione in due parti di una teoria dinamica è possibile solo in un approccio dualistico alla realtà fisica, in cui metrica e campo sono nettamente separati. In passato vi sono stati diversi tentativi di costruire teorie fisiche unitarie, in particolare cercando di unificare gravitazione ed elettromagnetismo. Weyl inizialmente tentò questa via introducendo il concetto di lunghezza non integrabile; successivamente, anche Einstein e Schrödinger introdussero connessioni non simmetriche. Questi tentativi non hanno però avuto esiti soddisfacenti. Fra l'altro, nel frattempo sono stati introdotti altri campi (elettronici, mesonici, ecc.) per spiegare le nuove interazioni scoperte dalla fisica nucleare (le interazioni forti e quelle deboli) per cui non sembra giustificato cercare di unificare solo gravitazione ed elettromagnetismo, trascurando gli altri campi esistenti in natura.

Ritornando ora al problema di partenza, rimane da scrivere un'equazione che colleghi il campo gravitazionale alla materia, cioè che generalizzi in qualche modo l'equazione di Poisson

$$\Delta^2\Phi=4\pi G\rho. \tag{23}$$

In precedenza, nel § 2.3, si è visto che l'equazione di Poisson poteva riscriversi nella forma

$$R_{00} = 4\pi G\rho \tag{24}$$

valida in un riferimento newtoniano. Prima di generalizzare la (24) alla relatività generale, è necessario conoscere qualcosa di piú sulle sorgenti del campo gravitazionale. Nella teoria newtoniana della gravitazione vi è una sola sorgente per il campo gravitazionale: la massa gravitazionale attiva μ_g che sperimentalmente è uguale, con alta precisione, alla massa gravitazionale passiva e quindi alla massa inerziale. Un importante teorema di relatività speciale afferma però che a ogni massa m corrisponde un'energia (a riposo) mc^2 e viceversa. Ne segue che, per effetto della relatività speciale, ogni forma di energia deve essere considerata sorgente del campo gravitazionale. Inoltre, la stessa relatività speciale insegna che qualsiasi sistema fisico può essere descritto mediante un «tensore energia-impulso» $T_{\alpha\beta}$. Rispetto a un particolare osservatore che usa un certo sistema di coordinate la componente T_{00} rappresenta la densità d'energia a riposo del sistema; le componenti T_{0a} rappresentano il flusso d'energia nelle direzioni x^a; infine le componenti T_{ab} rappresentano il flusso della componente lungo x^a dell'impulso nella direzione x^b ($a, b = 1, 2, 3$). Se il sistema è isolato, il tensore $T_{\alpha\beta}$ è simmetrico; inoltre esso deve verificare i principî di conservazione dell'energia e dell'impulso. Il tensore $T_{\alpha\beta}$ si riduce, nel riferimento in cui l'elemento di materia in considerazione è a riposo, alla sola componente $T_{00} = \rho c^2$. In conclusione, la relatività speciale induce ad assumere come sorgente del campo gravitazionale l'intero tensore $T_{\alpha\beta}$.

Per analogia con l'equazione (24) della teoria newtoniana, si sarebbe quindi portati ad assumere un'equazione del tipo

$$R_{\alpha\beta} = \chi T_{\alpha\beta} \tag{25}$$

(χ = costante) come equazione per il campo gravitazionale generato da una distribuzione di materia descritta dal tensore energia-impulso. Si vede però che la (25) è inconsistente con le equazioni di conservazione mentre il tensore $G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - (Rg_{\alpha\beta}/2) + \lambda g_{\alpha\beta}$ (λ = costante) soddisfa ad esse. Si può anche dimostrare che il tensore $G_{\alpha\beta}$ è il piú generale tensore doppio che si possa costruire dal tensore metrico $g_{\alpha\beta}$ mediante operazioni di derivazione e contrazione e che sia lineare nelle derivate seconde. In tal modo si arriva alle equazioni di Einstein per il campo gravitazionale

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta} \tag{26}$$

che possono essere assunte come secondo postulato fondamentale della relatività generale [cfr. Misner, Thorne e Wheeler 1973]. Si può dimostrare che le equazioni di Einstein (26) si riducono, nel limite per campi gravitazionali deboli e per piccole velocità della materia, all'equazione di Poisson (cfr. il § 7.2 dell'articolo «Relatività» in questa stessa *Enciclopedia*). Perciò tutta la fisica newtoniana è incorporata, come caso limite, nella relatività generale. Le equazioni (26) sono

state verificate, con una precisione di circa l'1 per cento, anche in casi in cui la teoria newtoniana non si può applicare, come lo spostamento del perielio di Mercurio.

Mediante le equazioni di Einstein si è ora in grado di dare una descrizione completa della struttura dello spazio-tempo della relatività generale.

3.3. Struttura causale dello spazio-tempo della relatività generale.

Poiché nell'intorno di un evento è sempre possibile scegliere un riferimento (localmente inerziale) in cui valgono le leggi della relatività speciale, si ha che in piccolo la struttura causale della relatività generale coincide con quella della relatività ristretta. Cioè, localmente, è il cono di luce minkowskiano della figura 3, centrato nell'evento p che separa il futuro e il passato causale di p. Globalmente, però, la struttura dello spazio-tempo della relatività generale può differire drasticamente da quella minkowskiana. Vi sono infatti delle soluzioni delle equazioni di Einstein che violano il principio di causalità comunemente inteso. Le metriche di Gödel [cfr. Hawking e Ellis 1973], ad esempio, che rappresentano universi omogenei in rotazione, presentano delle curve chiuse di tipo tempo. Ora, un osservatore in moto lungo tali curve ritornerebbe nel proprio passato, il che è senz'altro contrario all'esperienza comune della causalità. Per descrivere la realtà fisica (macroscopica) è perciò necessario scegliere, tra le soluzioni ammissibili delle equazioni di Einstein, quelle che sono in accordo con un principio di causalità formulato globalmente. Un'intera branca della relatività generale si propone di studiare i comportamenti causali globali dello spazio-tempo. Tali studi hanno portato ad una caratterizzazione piú precisa degli spazi-tempo soluzioni delle equazioni di Einstein che sono ammissibili sotto il profilo causale [cfr. Misner, Thorne e Wheeler 1973; Hawking e Ellis 1973].

Gli spazi-tempo che non violano il principio di causalità globalmente possono però avere una struttura causale abbastanza diversa da quella minkowskiana. Probabilmente le differenze piú significative consistono nell'esistenza di 1) orizzonti-evento, 2) orizzonti-particella.

Orizzonte-evento. Per una definizione matematicamente rigorosa di orizzonte-evento si rimanda alle due opere testé citate. Qui ci si limiterà a semplici considerazioni intuitive.

Si consideri un corpo sferico di massa M e di raggio R. Il potenziale gravitazionale alla superficie di tale corpo è GM/R. Perciò, una particella materiale di massa m, per poter sfuggire all'attrazione del corpo, deve possedere una velocità $v \geq \sqrt{2GM/R}$ (segue da energia cinetica $= (mv^2/2) >$ energia potenziale $= GMm/R$). La velocità $v_f = \sqrt{2GM/R}$ si chiama velocità di fuga e dipende solo dalla massa e dal raggio del corpo principale. Se si applica tale ragionamento anche ai fotoni, che vengono emessi con velocità costante c alla superficie del corpo, si ottiene la condizione $c \geq \sqrt{2GM/R}$ affinché i fotoni possano scappare dal corpo. Ne segue che in tal caso dev'essere $R \geq 2GM/c^2$. La quantità $R_S = 2GM/c^2$ si chiama raggio di Schwarzschild del corpo e dipende solo dalla

sua massa. Perciò $R \geq R_S$ è la condizione perché un corpo sferico possa comunicare con l'esterno mediante segnali luminosi o particelle materiali (quest'ultima asserzione segue dal fatto che c è la velocità limite). Nel caso del Sole, $R_S \simeq 1$ km ed essendo $R_\odot = 6{,}96 \times 10^{10}$ cm, la condizione $R_\odot \gg R_S$ è abbondantemente verificata; nel caso della Terra si ha $R_S \simeq 1$ cm, $R_\oplus = 6{,}37 \times 10^8$ cm e similmente $R_\oplus \gg R_S$.

La teoria dell'evoluzione stellare insegna che una stella di poco piú massiccia del Sole ($M \gtrsim 10 M_\odot$), una volta esaurito il suo combustibile nucleare, non possiede uno stato di equilibrio, per cui è costretta a collassare sotto l'azione del proprio campo gravitazionale. Perciò, ad un certo stadio del collasso, viene raggiunto e superato il punto in cui $R = R_S$; da quel momento in poi la stella è a tutti gli effetti invisibile ed incapace di comunicare con il mondo esterno e prende il nome di buco nero (dall'inglese *black hole*) [cfr. Penrose 1969]. La storia della superficie sferica $R = R_S$ prende il nome di orizzonte degli eventi. Essa separa gli eventi dello spazio-tempo in due classi causalmente sconnesse: gli eventi accaduti nella stella dopo che il punto di non-ritorno $R = R_S$ è stato superato, non possono essere causalmente congiunti ad osservatori esterni. È una congettura comunemente accettata in astronomia, anche se non ancora confermata dalle osservazioni, che l'universo sia popolato da stelle già collassate al di sotto dei loro raggi di Schwarzschild, cioè di buchi neri [cfr. Misner, Thorne e Wheeler 1973].

Sinora il nostro discorso è stato necessariamente di carattere euristico. Nel derivare la formula per il raggio di Schwarzschild si è applicato il concetto di velocità di fuga ai fotoni, in un miscuglio di relatività ristretta e gravitazione newtoniana (tale argomentazione fu introdotta da Laplace nel lontano 1799) [cfr. Hawking e Ellis 1973]. Una trattazione matematicamente rigorosa del collasso sferico nell'ambito della relatività generale conferma i risultati precedenti. In natura il collasso gravitazionale sarà accompagnato da deviazioni dalla simmetria sferica dovute alla presenza di rotazione, campo magnetico, ecc. Teoremi molto generali di relatività generale dimostrano che, per piccole deviazioni dalla simmetria sferica, le caratteristiche del collasso rimangono qualitativamente affini a quello sferico. In particolare rimane l'insorgere, durante il collasso, dell'orizzonte degli eventi come membrana che separa due regioni dello spazio-tempo causalmente sconnesse. In uno spazio-tempo che contiene orizzonti-evento si ha un clamoroso esempio di una struttura causale che si discosta radicalmente da quella minkowskiana. Si tornerà a parlare di buchi neri e di orizzonti-evento nel paragrafo sulle singolarità, alle quali essi sono strettamente collegati.

Orizzonte-particella. Il concetto di orizzonte-particella sorge naturalmente nell'ambito della cosmologia evoluzionistica. Lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali delle galassie lontane, insieme alla rivelazione del fondo di microonde alla temperatura di 3 °K sono considerati comunemente evidenze basilari dell'espansione dell'universo [cfr. Weinberg 1972]. Applicando le leggi della relatività generale all'espansione dell'universo (cfr. i §§ 4.4 e 4.5 dell'articolo

« Cosmologie » in questa stessa *Enciclopedia*), si dimostra che, per avere un soddisfacente accordo con le osservazioni, l'espansione dell'universo deve aver avuto inizio in un istante ben definito del passato, circa 10^{10} anni fa. L'origine dell'universo viene identificata con questo istante e consiste in uno stato estremamente denso e caldo della materia (*hot big bang*). Nei modelli della relatività generale tale inizio corrisponde a una « singolarità » dello spazio-tempo in un senso che sarà precisato in seguito. Un modello schematico di tali universi può essere rappresentato dal diagramma della figura 4, dove sono state soppresse due coordinate spaziali.

Le superfici $t =$ costante rappresentano le sezioni spaziali dell'universo. La superficie $t = 0$ rappresenta la singolarità iniziale. Le rette A e B rappresentano le linee di universo di osservatori comoventi A e B. Al tempo t l'osservatore A può ricevere informazioni solo dall'interno del suo cono di luce passato AP_1P_2; per cui la regione spaziale che può comunicare con l'osservatore A al tempo t è l'intersezione del cono di luce passato con la superficie $t = 0$. Tale regione si chiama orizzonte della particella A al tempo t. L'esistenza dell'orizzonte è una conseguenza della singolarità al tempo $t = 0$ e della velocità finita della luce. Nel caso dello spazio-tempo di Minkowski, infatti, poiché non vi è alcuna singolarità, il cono di luce passato può essere prolungato indefinitamente al di sotto di $t = 0$ e quindi il concetto di orizzonte perde significato. Si noti, dalla figura 4, che al tempo t gli osservatori A e B non hanno avuto modo di comunicare in quanto i loro coni di luce passati, al tempo t, hanno intersezione vuota. Nell'universo reale, cioè, potrebbero esserci delle galassie da cui non si sono ancora ricevuti segnali perché sono al di fuori del nostro orizzonte. Nella figura 4, i coni di luce passati sono stati disegnati schematicamente come se fossero minkowskiani, per cui anche se all'istante t essi non s'intersecano, s'intersecheranno in un istante successivo. In realtà, a seconda della distribuzione della materia, i coni di luce passati di A e B possono curvarsi su se stessi in modo da non intersecarsi mai. Se questo è il caso (le osservazioni astronomiche non sono conclusive a questo proposito), nell'universo reale potrebbero esistere galassie che non entreranno mai in comunicazione tra loro. Questa situazione, che potrebbe es-

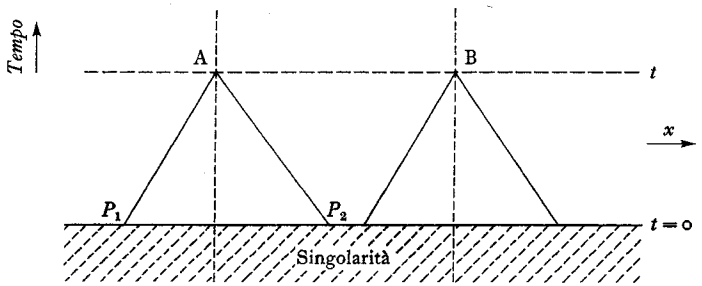


Figura 4.
Orizzonti-particella degli osservatori A e B.

sere richiesta da nuovi dati astronomici sulla densità dell'universo, comporterebbe seri problemi di carattere epistemologico. Infatti, in tal caso, la struttura attuale dell'universo sarebbe determinata in parte a priori, poiché non sarebbe mai possibile per un osservatore avere informazioni su tutte le galassie esistenti, quantunque lungo sia il tempo di osservazione. Su queste basi alcuni autori [cfr. Ellis 1975] hanno anche proposto una specie di principio d'indeterminazione cosmologica, che in qualche modo istituzionalizzi una certa inconoscibilità dell'universo. Comunque, l'applicazione della relatività generale alla cosmologia pone su nuove e impreviste basi il problema della conoscibilità dell'universo e quindi della possibilità di una cosmologia puramente empirica. La questione della verificabilità degli assiomi della cosmologia (topologia globale dello spazio-tempo, causalità, orizzonti...) è la base dell'interessante articolo di Ellis citato sopra, al quale si rimanda per un'analisi piú approfondita.

3.4. Il problema delle singolarità in relatività generale.

Si riparte dalla discussione del collasso gravitazionale del paragrafo precedente. Considerando una stella che collassa verso lo stato di buco nero in modo sferico, in relatività generale si dimostra che lo spazio-tempo esterno alla stella collassante ha la metrica di Schwarzschild

$$ds^2 = \left(1 - \frac{R_S}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{R_S}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta \, d\varphi^2) \tag{27}$$

dove t è il tempo coordinato (che coincide approssimativamente con il tempo proprio di un osservatore a grande distanza dalla stella) e r, ϑ, φ sono coordinate polari con polo il centro della stella. Tale sistema di coordinate ricopre però solo la regione $r > R_S$. Per studiare il fenomeno del collasso durante e dopo il passaggio attraverso l'orizzonte-evento a $r = R_S$ si usano perciò delle coordinate $(v, r, \vartheta, \varphi)$ (di Finkelstein) che ricoprono l'intera regione $0 < r < \infty$ dove v è un tempo «avanzato» dato da $v = t + r + R_S \log(r - R_S)$. Nelle nuove coordinate il collasso gravitazionale viene descritto dal diagramma della figura 5.

Le due coordinate angolari sono state soppresse e sono stati disegnati i coni di luce di un osservatore che passa attraverso l'orizzonte-evento e la linea di universo della superficie della stella collassante.

Si ritrovano qui i risultati ottenuti nel paragrafo precedente sulla base di una rozza approssimazione newtoniana. Una volta che la stella è collassata entro il raggio di Schwarzschild, i coni di luce sono inclinati in modo tale che la stella 1) non può piú riesplodere fuori (dovendo la sua linea di universo rimanere interna al cono di luce), 2) non può piú inviare segnali all'esterno (dovendo la linea d'universo dei fotoni rimanere interna al cono di luce). Per un osservatore esterno, quindi, si crea un buco nero. Gli stessi risultati valgono per un osservatore che cade nel buco nero. Cioè, una volta oltrepassato l'orizzonte-evento, l'osservatore non può piú ri-uscire né inviare segnali al mondo esterno. Quale sarà il destino di tale osservatore? Dall'inclinazione del cono di luce si vede che esso è costretto a cadere sempre piú in direzione della regione $r = 0$ (non rap-

presentata nel diagramma in quanto la metrica non vi è definita). Poiché si trova che il tensore di curvatura tende a ∞ come r^{-3} per $r \to 0$, si ha che le forze di marea gravitazionali tendono all'infinito e finiscono in ultima istanza col distruggere l'osservatore. Questi incontra quindi una singolarità dello spa-

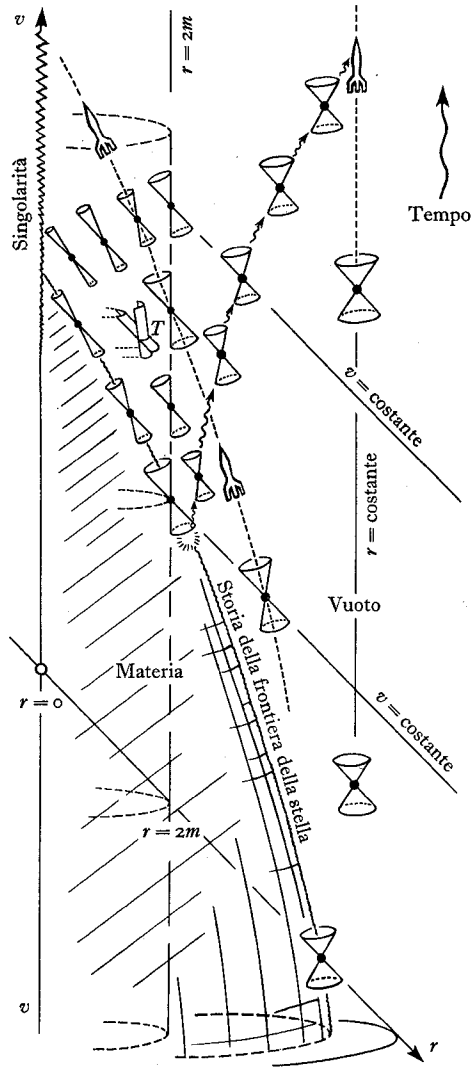


Figura 5.
Collasso a simmetria sferica in coordinate di Finkelstein. (Da Penrose 1969).

zio-tempo dovuta a curvatura infinita. Questo risultato è estremamente interessante, in quanto nell'intorno della singolarità la definizione di spazio-tempo sviluppata nel § 1, basata sul concetto di varietà differenziabile, è completamente inapplicabile. Se quindi la descrizione generale del collasso gravitazionale a simmetria sferica dovesse essere presa sul serio, ci si troverebbe di fronte a una delle svolte radicali della fisica. La relatività generale cioè, pur basata nei suoi fondamenti sul concetto di continuo spazio-temporale, se sviluppata logicamente fino alle sue estreme conseguenze, porterebbe alla negazione della struttura continua dello spazio-tempo, cioè a mettere in crisi uno dei concetti di base della fisica moderna. Proprio per evitare queste estreme conseguenze, nel passato è stato suggerito, specialmente da parte della scuola russa [cfr. Penrose 1969], che la singolarità del collasso gravitazionale sferico fosse dovuta all'eccezionale simmetria del fenomeno e sarebbe scomparsa nel caso di un collasso realistico (con rotazione, campo magnetico e varie altre asimmetrie). Il ragionamento fatto era grosso modo il seguente. Nel collasso gravitazionale sferico newtoniano s'incontra pure uno stato singolare di densità infinita al centro. Questo risultato è però una conseguenza del fatto che la materia della stella è diretta simultaneamente verso il centro a causa della simmetria sferica. Quando si tiene conto delle perturbazioni asimmetriche presenti in un collasso realistico, si ha che le particelle provenienti da direzioni diverse possono mancarsi e quindi che i vari strati della stella possono, per cosí dire, passare l'uno attraverso l'altro ed evitare il collasso a una densità infinita. Si sperava quindi che anche nell'ambito della relatività generale l'inclusione di perturbazioni asimmetriche avrebbe fatto sparire la singolarità di curvatura infinita a $r = 0$. È grande merito della scuola inglese aver dimostrato la falsità di tale congettura. Sostanzialmente il risultato dei «teoremi di singolarità» di Hawking e Penrose è che l'esistenza di (almeno) una singolarità è una caratteristica *stabile* del collasso gravitazionale con perturbazioni, anche se la *struttura* della singolarità può essere radicalmente differente di quello nel caso a simmetria sferica. Vista l'importanza delle singolarità per la nostra concezione dello spazio-tempo ci si soffermerà ora un po' sul contenuto dei teoremi di singolarità.

Anzitutto occorre una definizione piú generale di singolarità. Si consideri un osservatore che cade liberamente in un buco nero di Schwarzschild verso $r = 0$. Si sa che la linea d'universo dell'osservatore è una geodetica di tipo tempo parametrizzata con parametro affine s (tempo proprio). In un tempo proprio finito l'osservatore incontra la singolarità di curvatura a $r = 0$ per cui la sua linea d'universo termina nella singolarità. Ne segue che la singolarità di curvatura comporta l'esistenza di geodetiche di tipo tempo che non possono essere prolungate per valori arbitrariamente grandi del parametro affine. Tali geodetiche si dicono incomplete. Uno spazio-tempo che ammette delle geodetiche incomplete si dice una varietà geodeticamente incompleta. La definizione di singolarità adottata da Hawking e Penrose è quella di incompletezza per le geodetiche di tipo tempo. L'esistenza di geodetiche di tipo tempo incomplete in uno spazio-tempo significa che vi sono degli osservatori le cui linee d'universo sono curve, che ad un certo istante ben definito incontrano il «confine» dello spazio-tempo.

Tale situazione può a buon diritto essere definita singolare in quanto contraddice tutte le idee usuali sullo spazio-tempo. Nel caso della soluzione di Schwarzschild l'incompletezza geodetica è strettamente collegata alla presenza di una curvatura infinita; in generale questo può non esser vero, come si dimostra dall'analisi di altre soluzioni esatte delle equazioni di Einstein [cfr. Hawking e Ellis 1973].

Prima di formulare in modo piú preciso i teoremi di singolarità, occorre illustrare brevemente il concetto di superficie intrappolata [cfr. Penrose 1969]: «Una superficie intrappolata è una superficie bidimensionale di tipo spazio, compatta, tale che le geodetiche di tipo luce che la incontrano riconvergono verso la superficie». Fisicamente, cioè, il campo gravitazionale nell'intorno di una tale superficie è talmente forte che un fascio di luce da essa inizialmente emesso ricade sulla stessa superficie. Nella figura 5, che rappresenta il collasso gravitazionale sferico, ogni punto interno all'orizzonte-evento (che è in realtà una sfera bidimensionale) rappresenta una superficie intrappolata.

Ed ecco infine i teoremi di singolarità. Le ipotesi essenziali (a parte altre minori di carattere squisitamente tecnico) sono: 1) la positività della densità di energia della materia (la cui formulazione matematica richiede in parte l'uso delle equazioni di Einstein); 2) l'esistenza di una superficie intrappolata; 3) il principio di causalità nel senso della non-esistenza di curve chiuse di tipo tempo. Sotto tali ipotesi Hawking e Penrose dimostrano che lo spazio-tempo deve essere necessariamente singolare, nel senso che vi sono delle geodetiche di tipo tempo che sono incomplete.

Si tratta ora di vedere che cosa significhino i teoremi di singolarità per il collasso gravitazionale realistico. Nel collasso a simmetria sferica, come s'è visto, vi sono delle superfici intrappolate. Ora si dimostra che questa proprietà è stabile, nel senso che piccole perturbazioni della simmetria sferica non distruggono l'esistenza di superfici intrappolate. Ne segue che i teoremi di singolarità si possono applicare al collasso gravitazionale realistico, cioè con perturbazioni della simmetria sferica. Il contenuto astrofisico dei teoremi di Hawking e Penrose è quindi che nel collasso gravitazionale di una stella massiccia si sviluppano delle singolarità (nel senso di geodetiche di tipo tempo incomplete), non necessariamente dovute alla presenza di una curvatura infinita. I teoremi di Hawking e Penrose, con leggere modifiche, possono essere applicati anche a livello cosmologico. È noto che i modelli cosmologici della relatività generale, che rappresentano un universo uniforme che si espande isotropicamente, ammettono una singolarità iniziale a $t = 0$, il cosiddetto *big bang* di curvatura infinita. Nel passato si cercò di attribuire questa singolarità cosmologica alle speciali simmetrie dei modelli cosmologici. Si può però dimostrare che i teoremi di singolarità continuano a sussistere qualora si sostituisca l'ipotesi 2) con la seguente 2'): Esiste un osservatore tale che il suo cono di luce passato riconverge. Ciò vuol dire, fisicamente, che vi è stata abbastanza concentrazione di materia nel passato, da far riconvergere le geodetiche di tipo luce dirette verso il passato. Ebbene, Hawking e Ellis [1973], sfruttando l'esistenza della radiazione cosmica di 3 °K, hanno dimostrato con considerazioni astrofisiche che la condizione 2') è verificata dal-

l'osservatore terrestre. Perciò, anche se l'universo attuale non è esattamente uniforme e isotropo (e a maggior ragione non lo era nel passato), ad esso possono applicarsi i teoremi di Hawking che in questo caso predicono l'esistenza di singolarità nel passato (non necessariamente del tipo di curvatura infinita). Si deve quindi concludere che l'evidenza astrofisica, insieme alla relatività generale, porta a predire l'esistenza di singolarità nello spazio-tempo.

Prima di discutere le varie tecniche che sono state proposte per «curare» le singolarità dello spazio-tempo, bisogna accennare a un problema strettamente collegato al collasso gravitazionale. Si è visto che, nel collasso gravitazionale quasi-sferico di una stella, si creano sia un orizzonte degli eventi sia una singolarità; quest'ultima è «nascosta» a un osservatore esterno (fuori dall'orizzonte). Si crea cioè un buco nero che isola la singolarità dal mondo esterno. Se tutte le singolarità esistenti in natura fossero nascoste da orizzonti, il problema di costruire una fisica nell'intorno delle singolarità sarebbe molto meno grave, in quanto esse sarebbero inosservabili per un osservatore esterno. Rimarrebbe solamente la singolarità cosmologica a non essere nascosta da un orizzonte; ma essa *è praticamente inosservabile* a causa dell'enorme opacità della materia nel passato [cfr. Ellis 1975]. Penrose ha perciò proposto la congettura del censore cosmico, secondo cui tutte le singolarità risultanti dal collasso gravitazionale di una stella sono necessariamente nascoste (vestite) da orizzonti. Ciò è vero nel caso di collasso quasi sferico, ma all'autore non è noto se la congettura del censore cosmico è valida anche per un collasso con forti perturbazioni della simmetria sferica. Se quindi in natura esistono delle singolarità «nude», cioè non nascoste da orizzonti, si aprono nuovi campi d'indagine sullo spazio-tempo. Infatti, nell'immediato intorno di una singolarità, la causalità può essere violata (con la conseguente impossibilità di predire) [cfr. Penrose 1969]. Inoltre la materia, a livello anche subnucleare, è soggetta a forze gravitazionali intensissime che tendono a spezzarla. Nasce quindi il problema di descrivere il comportamento della materia subnucleare, retta da leggi quantistiche, posta nell'enorme campo gravitazionale di una singolarità. È possibile che in tal caso convenga adottare un modello discreto per lo spazio-tempo, sul tipo di quello proposto da Penrose cui si è accennato nel § 1. Il problema della fisica nell'intorno di una singolarità e del matrimonio tra teoria quantistica e relatività generale è attualmente alla frontiera della ricerca nella fisica teorica moderna. [A. M. A.].

Dicke, R. H.
1964 *The Theoretical Significance of Experimental Relativity*, Gordon and Breach, New York.

Ellis, G. F.
1975 *Cosmology and verifiability*, in «The Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society», XVI, 3, pp. 245-64.

Hawking, S. W., e Ellis, G. F.
1973 *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, London.

Mach, E.
1883 *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch-kritisch dargestellt*, Brockhaus, Leipzig (trad. it. Boringhieri, Torino 1968).

Misner, C. W.; Thorne, K. S.; e Wheeler, J. A.
1973 *Gravitation*, Freeman, San Francisco.

Penrose, R.
1969 *Gravitational collapse: the role of general relativity*, in «Rivista del Nuovo Cimento», I, pp. 252-76.

Recami, E., e Mignani, R.
1974 *Classical theory of tachyons (Special relativity extended to superluminal frames and objects)*, in «Rivista del Nuovo Cimento», IV, 2, pp. 209-90.

Synge, J. L.
1965 *Relativity: the Special Theory*, North-Holland, Amsterdam.

Weinberg, S.
1972 *Gravitation and Cosmology*, Wiley, New York.

Lo spazio-tempo (cfr. **spazialità, tempo/temporalità**) è studiato oggi dalla **fisica** di cui la cosmologia (cfr. **cosmologie**) costituisce semplicemente una branca. Essa combina un approccio matematico (cfr. **matematiche, strutture matematiche**), quello della geometria e della topologia (cfr. **geometria e topologia**), con uno studio dei dati (cfr. **dato**) dell'**osservazione** astronomica (cfr. **astronomia**), della distribuzione della **materia** nell'**universo**, degli esperimenti (cfr. **esperimento, empiria/esperienza**) sulle particelle (cfr. **particella, quanti**), e con le analisi teoriche (cfr. **teoria/modello**) delle fluttuazioni dell'**energia** e della crescita dell'**entropia**. È in tal modo che oggi sono abbordati i problemi di cui un tempo si occupava la filosofia (cfr. **filosofia/filosofie**) e che vertono sugli **elementi** (cfr. anche **alchimia, astrologia**), il cosmo (cfr. **caos/cosmo**), il rapporto fra l'assai piccolo e l'assai grande (cfr. **macrocosmo/microcosmo**).